

(19) 世界知的所有権機関  
国際事務局(43) 国際公開日  
2003年7月17日 (17.07.2003)

PCT

(10) 国際公開番号  
WO 03/057427 A1

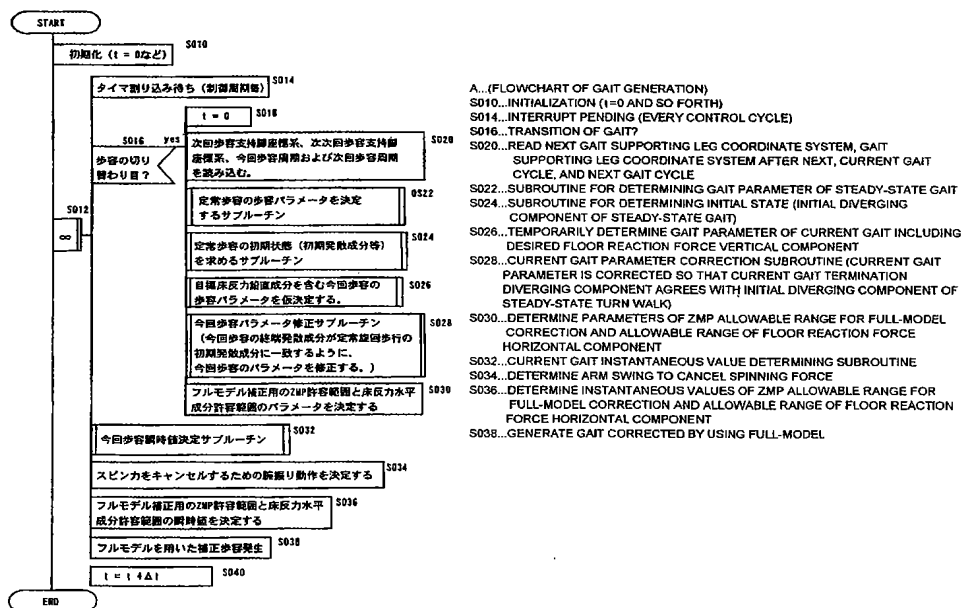
- (51) 国際特許分類<sup>7</sup>: B25J 5/00, 13/00 (72) 発明者; および  
(75) 発明者/出願人 (米国についてのみ): 竹中 透 (TAKE-  
(21) 国際出願番号: PCT/JP02/13784 NAKA,Toru) [JP/JP]; 〒351-0193 埼玉県 和光市 中央  
1丁目4番1号 株式会社本田技術研究所内 Saitama  
(22) 国際出願日: 2002年12月27日 (27.12.2002) (JP). 松本 隆志 (MATSUMOTO,Takashi) [JP/JP]; 〒  
351-0193 埼玉県 和光市 中央 1丁目4番1号 株  
(25) 国際出願の言語: 日本語 式会社本田技術研究所内 Saitama (JP). 吉池 孝英  
(YOSHIKE,Takahide) [JP/JP]; 〒351-0193 埼玉県 和  
(26) 国際公開の言語: 日本語 光市 中央 1丁目4番1号 株式会社本田技術研究所  
内 Saitama (JP).
- (30) 優先権データ:  
特願 2001-399495 (74) 代理人: 佐藤 辰彦, 外 (SATO,Tatsuhiko et al.); 〒  
2001年12月28日 (28.12.2001) JP 151-0053 東京都 渋谷区 代々木 2-1-1 新宿マイ  
ン  
スタワー 16階 Tokyo (JP).
- (71) 出願人 (米国を除く全ての指定国について): 本  
田技研工業株式会社 (HONDA GIKEN KOGYO  
KABUSHIKI KAISHA) [JP/JP]; 〒107-8556 東京都 港  
区 南青山二丁目1番1号 Tokyo (JP). (81) 指定国 (国内): JP, KR, US.
- (84) 指定国 (広域): ヨーロッパ特許 (DE, FR, GB).

[続葉有]

(54) Title: GAIT GENERATION DEVICE FOR LEGGED MOBILE ROBOT

(54) 発明の名称: 脚式移動ロボットの歩容生成装置

A (歩容生成処理のフローチャート)



(57) Abstract: A gait generation device comprises means for setting the a limited variable such as the translation floor reaction force horizontal component (associated with friction force) acting on a robot (1) or ZMP, and the allowable range of the limited variable, means for determining at least a temporary instantaneous value of the desired floor reaction force of the robot (1) and a temporary instantaneous value of a desired motion,

[続葉有]



添付公開書類：  
— 国際調査報告書

2文字コード及び他の略語については、定期発行される各PCTガゼットの巻頭に掲載されている「コードと略語のガイダンスノート」を参照。

---

and means for receiving at least the temporary instantaneous value of the desired motion and determining the temporary instantaneous value of the desired motion used to determine the model floor reaction force instantaneous value by using a kinetic model. The temporary instantaneous value of the desired motion is corrected on the basis of the difference between the model floor reaction force instantaneous value and the desired floor reaction force temporary instantaneous value and the allowable range of the limited variable so that the limited variable may lie within the allowable range and the kinetic balance condition on the kinetic model may be satisfied, thus finally determining the desired instantaneous value.

(57) 要約:

ロボット1に作用する並進床反力水平成分（摩擦力に係わる成分）や、ZMP等の制限対象量、許容範囲を設定する手段と、少なくともロボット1の目標床反力の仮瞬時値および目標運動の仮瞬時値を決定する手段と、少なくともその目標運動の仮瞬時値を入力として、動力学モデルによりモデル床反力瞬時値を決定する目標運動の仮瞬時値を動力学モデルにより決定する手段とを備える。モデル床反力瞬時値と目標床反力の仮瞬時値との差や、制限対象量の許容範囲に基づいて、制限対象量が許容範囲に収まり、且つ動力学モデル上での動力学平衡条件が満たされるように目標運動の仮瞬時値を補正し、最終的に目標瞬時値を得る。

## 明 細 書

## 脚式移動ロボットの歩容生成装置

## 技術分野

本発明は、脚式移動ロボットの歩容生成装置に関する。

5

## 背景技術

本出願人は先に特願 2 0 0 0 - 3 5 2 0 1 1 号において、比較的単純なロボット動力学モデルを用いて、近似的に動力学平衡条件を満足しつつ継続的に移動できる（すなわち発散しない）自在な歩容（以降、近似歩容と呼ぶ）をリアルタイムに生成する技術を提案している。

10

さらには、特願 2 0 0 1 - 1 3 3 6 2 1 号において、動力学平衡条件を精度良く満足しつつ、かつ、上記生成された近似歩容にほぼ追従して発散することのないように補正された歩容を生成する技術を提案している。以降、補正された目標歩容を補正目標歩容あるいは補正歩容と呼ぶ。

15

しかし、特願 2 0 0 1 - 1 3 3 6 2 1 号においては、補正歩容の発散を防止するために、元々の適切に設計された目標床反力をずらしてしまう。つまり、元々の適切に設計された目標 Z M P のまわりに床反力モーメントを発生（作用）させるように変更されてしまうか、あるいは、目標 Z M P 自身が修正される。

20

以降、適切に設計された目標床反力を理想目標床反力と呼び、適切に設計された目標 Z M P を理想目標 Z M P と呼ぶ。

次式に示すように、目標 Z M P を理想目標 Z M P からずらすことは、理想目標 Z M P のまわりに、（目標 Z M P のずらし量）＊（並進床反力鉛

直成分)の床反力モーメントを発生させることと等価である。

理想目標ZMPのまわりの床反力モーメント

= 目標ZMPのずらし量 \* 床反力の並進力鉛直成分

5

…式 b 0 1

尚、並進床反力鉛直成分は、床反力の鉛直軸まわりモーメントと誤解するおそれがない限り、以降、床反力鉛直成分と略す場合がある。

ところで、補正歩容の発散を防止し安定化させる能力は、理想目標ZMPのまわりに発生可能な床反力モーメントの最大値(最小値)に依存する。

ロボットの歩行を行なう場合には、床反力鉛直成分が常にほぼ自重相当であり、また目標ZMPの存在可能範囲(接地面を囲む最小多角形であり、支持多角形とも呼ばれる)も広いので、存在可能範囲内で目標ZMPをずらすことによって、理想目標ZMPのまわりに床反力モーメントを発生させて、補正歩容の発散を防止することができる。

それに対し、ロボットの走行を行なう場合には、ロボットの全脚体が空中に存在して、床反力鉛直成分が0になることがしばしば発生する。この時には、通常、床反力のすべての成分(並進力およびモーメントの各成分)は0となる。したがって、全脚体が空中に存在している時には、理想目標ZMPのまわりに床反力モーメントを発生させることによって補正歩容の発散を防止することはできない。

また、いずれかの脚体が接地していても、床反力鉛直成分が0に近い場合には、目標ZMPの存在可能範囲内で目標ZMPをずらしても、これによって発生する理想目標ZMPまわりの床反力モーメントはわずかなしかな。なぜなら、理想目標ZMPまわりのモーメントは、上記のご



とく目標 Z M P 修正量と床反力鉛直成分の積であるからである。したがって、この場合にも、やはり補正歩容の発散を防止することができない。

上記のごとく、床反力鉛直成分が 0 または 0 に近い場合には、理想目標 Z M P のまわりに発生可能な床反力モーメントの絶対値が小さいために、補正歩容の発散を防止することができない。したがって、床反力鉛直成分が十分に大きい時に、補正歩容を近似歩容に近づける必要がある。

補足すると、床とロボットの足裏が接触していて、その間に粘着力（吸引力）が発生できる場合には、床反力鉛直成分が 0 でも床反力モーメントを発生させることが可能であるが、一般的に、脚式移動ロボットの制御においては、粘着力（吸引力）はないものと想定している。また、ロボットの通常的な動作環境下では、床と足裏との間にはほとんど粘着力が発生しない。

また、床反力鉛直成分が 0 の場合には、目標 Z M P は、不定であり、任意の位置に設定できるが、床反力のすべての成分は 0 であり、目標 Z M P をずらしても、理想目標 Z M P のまわりに床反力モーメントを発生させることはできない。

ところで、前記特願 2 0 0 1 - 1 3 3 6 2 1 号において具体的に指摘していないもうひとつ重要な問題として、スリップがある。

特願 2 0 0 1 - 1 3 3 6 2 1 号の実施形態においては、ロボットの運動によって発生する慣性力と重力との合力が元々の目標 Z M P まわりに発生するモーメントを 0 にし、または上記のごとく補正歩容の発散を防止するための床反力モーメント（特願 2 0 0 1 - 1 3 3 6 2 1 号に記載の目標 Z M P まわりのフルモデル補正モーメント）に一致させるように、補正歩容の上体水平加速度が調整（変化）される。言い換えると、全体重心水平加速度が調整（変化）される。したがって、結果的に該全体重心水平加速度に釣り合う床反力水平成分も変化する。

ところで、水平床面を移動する場合、床反力水平成分は摩擦によって発生する。

摩擦係数が高いある床面を歩行する場合には、床反力鉛直成分が常にほぼ自重相当であるので、摩擦力（すなわち床反力水平成分）の限界値  
5 が高く、上記のごとく補正歩容の上体水平加速度を変化させてもスリッ  
プしにくい。

これに対し、摩擦係数が低い床面を歩行する場合には、摩擦力（床反力水平成分）の限界値が低いので、上記のごとく補正歩容の上体水平加速度を変化させると、それに釣り合う床反力水平成分を発生できずに、  
10 スリップする恐れがある。

また、走行においては、床反力鉛直成分がほぼ0になる時があり、この時には、床面の摩擦係数が高くとも、摩擦力（床反力水平成分）の限界値はほぼ0になる。したがって、走行の場合も、上記のごとく補正歩容の上体水平加速度を変化させると、スリップする恐れがある。

15 しかも、走行においては、床反力鉛直成分が0になる時（両脚体が空中に存在する時）があり、この時には、摩擦力（床反力水平成分）も0になるので、全体重心水平加速度は0（等速運動）とならざるを得ない。換言すれば、ロボットの歩容は、全体重心水平加速度が0になるような歩容にならざるを得ない。

20 以上のように、ロボットの走行および低摩擦係数床面での歩行においては、重力と慣性力との合力が理想目標ZMPまわりに発生するモーメントを0にし、または上記のごとく補正歩容の発散を防止するための床反力モーメントに一致させるように、補正歩容の上体水平加速度（または全体重心水平加速度）を調整する（変化させる）ことが困難または不  
25 可能な場合が生じる。

一方、本出願人は、ロボットの走行や低摩擦係数床面での歩行などを

考慮して、目標 Z M P 軌道、目標床反力鉛直成分軌道および床反力水平成分許容範囲を明示的に設定し、目標床反力 Z M P 軌道と目標床反力鉛直成分軌道を満足し、かつ床反力水平成分が床反力水平成分許容範囲内になるように、歩容の運動（足平位置姿勢軌道や上体位置姿勢軌道）を生成する技術を試みている。

この技術では、厳密な動力学モデルを用いれば、厳密に動力学平衡条件（重力と慣性力との合力が目標 Z M P まわりに作用するモーメントが 0 であること）を満足することに加えて、床反力水平成分は、常に床反力水平成分許容範囲内に収めることができる。しかし、厳密な動力学モデルを用いると、運動方程式を解く演算量が多くなる。さらに、厳密な動力学モデルの非線形性が強いために、本願出願人が先に提案した特願 2 0 0 0 - 3 5 2 0 1 1 号で説明されている定常歩容の境界条件（歩容の初期と終端との上体位置速度等が一致することなど）を満足する歩容パラメータ、すなわち、ロボットの継続的な安定した運動を可能とする歩容パラメータを探索する際に、収束率が低下して探索回数も増える。このため、全体の演算量が多大になり、高速コンピュータないしは動力学モデル演算を行う専用 IC が必要となる。また、ロボットの運動を行ないながら、リアルタイムで歩容を生成することも困難となる。

逆に、単純な近似動力学モデルを用いると、演算量は少なくなるが、動力学平衡条件を十分な精度で満足できなくなる、あるいは、実際に生成される歩容の Z M P が存在可能範囲を越える、あるいは、床反力水平成分が床反力水平成分許容範囲（摩擦限界）を越える等の不都合を生じる。このため、この生成された歩容を目標値にして実際のロボットを運動させた時に、ロボットの動作が不安定になったりスリップしたりする恐れが大きくなる。

従って、本発明の目的は先に提案した技術の不都合を解消することに

あり、通常の歩行以外にも、走行や低摩擦係数床面での歩行などの多様な目標歩容が、比較的少ない演算量で生成できる歩容生成装置を提供することにある。またさらに、本発明は、生成した歩容が動力学平衡条件を精度良く満足し、ZMPや床反力水平成分等が適切な許容範囲内に存在するようにすることができる歩容生成装置を提供することを目的とする。

#### 発明の開示

本願の第1発明は、上体から延設された複数の脚体を運動させて移動する脚式移動ロボットの目標歩容を生成する歩容生成装置において、前記ロボットに作用する並進床反力水平成分又は並進床反力の床面平行成分又は該ロボットの全体重心加速度水平成分又は全体重心加速度の床面平行成分と、床反力モーメント又はZMPとのうちの少なくともいずれかを制限対象量とし、該制限対象量の許容範囲を設定する許容範囲設定手段と、前記目標歩容を構成する目標運動及び目標床反力の仮瞬時値を決定する仮瞬時値決定手段と、少なくとも前記目標運動の仮瞬時値を、前記ロボットの運動と床反力との関係を表す動力学モデルに入力し、該動力学モデルの出力としてのモデル床反力瞬時値を求めるモデル演算手段と、少なくとも該モデル床反力瞬時値と前記目標床反力の仮瞬時値との差と、前記許容範囲とに基づき、前記目標運動の仮瞬時値を補正して目標運動の目標瞬時値を決定する目標瞬時値決定手段とを備え、該目標瞬時値決定手段は、前記目標運動の目標瞬時値によって発生するロボットの慣性力と重力との合力に前記動力学モデル上で略釣り合う床反力の瞬時値に対応する前記制限対象量が前記許容範囲内に収まるように前記目標運動の仮瞬時値を補正することを特徴とするものである。

なお、本発明（第1発明以外の発明を含む）において、前記並進床反

力の水平成分又は該並進床反力の床面平行成分（詳しくは床面に平行な成分）又はロボットの全体重心加速度の水平成分又は該全体重心加速度の床面平行成分は、いずれも摩擦力に比例もしくはほぼ比例するものである。そこで、以下の説明では、便宜上、これらを総称的に摩擦力成分  
5 ということがある。

かかる第1発明によれば、前記モデル演算手段では、少なくとも目標運動の仮瞬時値（脚体先端部の位置姿勢等の瞬時値）を入力として、モデル床反力瞬時値（目標運動の仮瞬時値に対応して、前記動力学モデル上で慣性力と重力との合力に釣り合う床反力の瞬時値）を求めるだけであるので、前記動力学モデルが比較的厳密なものであっても、比較的少ない演算量でモデル床反力瞬時値を求めることができる。この場合、このモデル床反力瞬時値と目標床反力の仮瞬時値との差は、前記動力学モデルに入力される目標運動および目標床反力の仮瞬時値の動学的平衡条件（運動によって発生する慣性力と重力との合力と、床反力との釣り  
10 合いに関する条件）に対する誤差（以下、上記差を仮瞬時値誤差という）を表すものとなる。ただし、第1発明を必要要件とする後述の第16～第22発明においては、前記動力学モデルに入力される目標運動は、該目標運動の仮瞬時値を補正したものなので、厳密な意味での誤差ではないが、便宜上、誤差と呼ぶ。そして、第1発明では、少なくともこの  
15 仮瞬時値誤差と、前記制限対象量の許容範囲とに基づいて、目標運動の仮瞬時値が補正され、目標運動の目標瞬時値が決定される。このとき、目標運動の目標瞬時値によって発生するロボットの慣性力と重力との合力に前記動力学モデル上で略釣り合う床反力の瞬時値に対応する前記制限対象量が前記許容範囲に収まるように前記目標運動の仮瞬時値が補正  
20 される。これにより、探索的な演算処理等を行なうことなく、前記制限対象量（前記摩擦力成分又はZMP又は床反力モーメント）が許容範囲

内に収まるような目標歩容の目標瞬時値を少ない演算量で決定することができる。また、前記摩擦力成分等の制限対象量が許容範囲内に収まるような目標歩容の目標瞬時値を決定できることで、通常の歩行以外にも、走行や低摩擦係数床面での歩行など、多様な目標歩容を適正に生成することができる。

なお、前記動力学モデルは、基本的には、近似精度の高いものを用いることが好適である。これにより、動力学平衡条件を精度よく満足し得る目標歩容を生成できる。

また、第1発明では基本的には、前記制限対象量を許容範囲内に収めつつ、前記仮瞬時値誤差をできるだけ安定化するまたは0に近づくように（該誤差の変動ができるだけ少なくなるように）、前記仮瞬時値を補正することが好ましい。

かかる第1発明では、前記モデル演算手段が求めるモデル床反力瞬時値は少なくとも床反力モーメント又はZMPのモデル値を含むと共に、前記仮瞬時値決定手段が決定する前記目標床反力の仮瞬時値は少なくとも床反力モーメント又はZMPの仮目標瞬時値を含み、前記目標瞬時値決定手段が用いる前記差は、前記床反力モーメント又はZMPのモデル値と、該床反力モーメント又はZMPの仮目標瞬時値との差であることが好適である（第2発明）。これによれば、前記仮瞬時値誤差が、動力学平衡条件に対する誤差を表すものとしての信頼性が高まる。従って、仮目標瞬時値の補正を適正に行い、動力学平衡条件を精度良く満足し得る目標歩容を生成できる。

また、前記第1および第2発明では、前記目標瞬時値決定手段は、前記目標運動の目標瞬時値によって発生するロボットの慣性力と重力との合力に前記動力学モデル上で略釣り合う床反力の瞬時値を目標床反力の目標瞬時値として決定することが好ましい（第3発明）。これによれば、

目標運動の目標瞬時値に対して、動力学的平衡条件を精度よく満足する目標床反力の目標瞬時値を決定できる。

前記第 1 ～ 第 3 発明では、前記目標瞬時値決定手段は、前記ロボット  
の摂動運動と摂動床反力との関係を表す摂動モデルと、少なくとも前記  
5 差と前記許容範囲とに基づき前記摂動モデルの摂動床反力を操作する摂  
動モデル操作量を決定する手段と、その決定した摂動モデル操作量を前  
記摂動モデルに入力することにより前記目標運動の補正量を求める手段  
と、該補正量により前記目標運動の仮瞬時値を補正することにより前記  
目標運動の目標瞬時値を決定する手段とを備えることを好ましい（第 4  
10 発明）。

すなわち、ロボットの摂動運動とそれに対する摂動床反力との関係は  
線形性が高いので、前記摂動モデルを用いることで、適正な目標運動の  
補正量の算出が容易になると共に、その補正量による前記仮瞬時値の補  
正が容易になる。また、摂動モデルの摂動床反力を操作するものを摂動  
15 モデル操作量として決定することで、床反力に密接に関連する前記制限  
対象量を前記許容範囲内に制限するための適切な摂動操作量を決定する  
ことができる。

さらに、摂動モデルを用いる第 4 発明では、少なくとも前記摂動モデ  
ルの状態量に応じて前記摂動モデル操作量の要求値を決定する手段を備  
20 え、前記摂動モデル操作量を決定する手段は、前記差（仮瞬時値誤差）、  
前記許容範囲、及び前記要求値に基づき前記摂動モデルに入力する摂動  
モデル操作量を決定することが好ましい（第 5 発明）。

これによれば、前記仮瞬時値誤差や許容範囲だけでなく、摂動モデル  
の状態量（摂動モデルの要素としての質点や回転体の位置や回転角、あ  
25 るいはそれらの変化速度等）の要求値を考慮して、前記摂動モデル操作  
量が決定される。これにより、摂動モデルの挙動の安定性を高め、ひい

ては、不適正な目標運動の補正量が求められてしまうような事態を防止できる。

この場合、特に、前記摂動モデル操作量の要求値を前記摂動モデルの状態量と該状態量に対する目標値との偏差に応じたフィードバック制御  
5 則により逐次決定する手段を備えることが好適である（第6発明）。

これによれば、摂動モデルの状態量がある目標値近傍に概ね維持されるように前記摂動モデル操作量が決定される。これにより、摂動モデルの挙動の安定性をより確実に高めることができる。

前記第4～第6発明では、前記摂動モデルは、前記摂動運動に対する  
10 並進床反力水平成分と床反力モーメントとの摂動比率が互いに異なる複数の摂動運動を含むモデルであり、前記摂動モデル操作量は、各摂動運動にそれぞれ対応する複数の操作量からなると共に、前記目標運動の補正量は、各摂動運動にそれぞれ対応する複数の補正量からなることが好ましい（第7発明）。

15 これによれば、前記目標運動の仮瞬時値を補正するためにロボットの複数種の摂動運動を操作できる。このため、ある1つの摂動モデルを操作しただけでは、前記制限対象量を許容範囲内に収めることができないような場合であっても、他の摂動モデルを操作し、あるいは複数種の摂動モデルを合成的に操作することで、制限対象量を許容範囲に収めるこ  
20 とができるような床反力を発生し得る目標運動の補正量を決定できる。従って、制限対象量の許容範囲の広さ等によらずに、制限対象量を許容範囲に収め得る目標運動の目標瞬時値を決定できる。

さらにこの第7発明では、前記複数の摂動運動は、例えば前記ロボットの上体の並進運動と、該ロボットの重心を略一定に維持しつつロボッ  
25 トの所定部位の姿勢を変化させる姿勢変化運動とからなることが好適である（第8発明）。これによれば、前記上体の並進運動によって、主に



並進床反力を操作でき、また、前記姿勢変化運動によって床反力モーメントを操作できるので、それらの運動の合成によって所望の床反力（制限対象量が許容範囲に収まるような床反力）を発生し得る目標運動の目標瞬時値を決定できる。

- 5       あるいは、前記第7発明では、前記複数の摂動運動は、前記ロボットの上体の並進水平運動と、該ロボットの上体の姿勢変化運動とからなることが好ましい（第9発明）。すなわち、ロボットの上体は一般に脚体等、他の部位に比べて質量が大きいので、それらの摂動運動に対する床反力の変化の感度が高い。従って、それらの摂動運動によるロボットの
- 10       目標運動の仮瞬時値の補正量を小さくでき、目標歩容におけるロボットの姿勢の安定性を高めることができる。

また、前記第7～第9発明においては、前記制限対象量は、前記ロボットに作用する摩擦力成分と、床反力モーメント又はZMPとからなる場合に好適である（第10発明）。

- 15       すなわち、第7～第9発明では、複数の摂動モデルを備えるため、前記摩擦力成分と、床反力モーメント又はZMPとの両者を制限対象量とする場合であっても、該制限対象量を許容範囲内に収め得る目標運動の仮瞬時値の補正量を確実に決定できる。その結果、ロボットの走行や、低摩擦係数の床面での歩行等、多種多様な条件下での目標歩容を適正に
- 20       生成できる。

- 前記摂動モデルを備えた前記第4発明にあっては、より具体的には、例えば前記摂動モデル操作量は、少なくとも前記差（仮瞬時値誤差）に応じて決定される第1操作量成分と、少なくとも前記許容範囲に基づき決定される第2操作量成分とを含み、前記摂動モデル操作量を決定する
- 25       手段は、前記第1操作量成分のみを前記摂動モデルに入力したと仮定した場合に決定される目標運動の目標瞬時値に対応する前記制限対象量の

推定値を求める手段と、その求めた制限対象量の推定値を前記許容範囲と比較し、その比較に基づき該許容範囲内に制限してなる制限済制限対象量を決定する手段と、少なくとも該制限済制限対象量に基づき前記第2操作量成分を決定する手段とを備える（第11発明）。

- 5       すなわち、第11発明では、前記摂動モデル操作量を決定するとき、まず、前記許容範囲を考慮せずに（制限対象量の許容範囲が無いものと仮定して）前記仮瞬時値誤差だけを考慮した第1操作量成分（これは基本的には、仮瞬時値誤差が安定になるまたは0に近づくように決定する）のみを、摂動モデルに入力したと仮定した場合に決定される目標運動の目標瞬時値に対応する前記制限対象量の推定値が求められる。そして、この制限対象量の推定値を許容範囲内に制限してなる制限済制限対象量を決定した上で、少なくともその制限済制限対象量に基づき第2操作量成分が決定される。これにより、制限対象量を許容範囲内に収めるために必要な第2操作量成分が適正に決定される。そして、このように
- 10       決定された第2操作量成分と前記第1操作量成分とが摂動モデルに入力されることで、前記仮瞬時値誤差を安定化になるまたは0に近づくようにしつつ、制限対象量を許容範囲内に収め得る目標運動の仮瞬時値の補正量、すなわち、適正な補正量を該摂動モデルから出力することができる。

- 15       なお、前記制限済制限対象量を決定する場合、基本的には、制限対象量の推定値にできるだけ近く、且つ許容範囲に存在するような値を制限済制限対象量として決定することが好ましい。

- 20       また、特に、摂動モデルに対する前記要求値を有する前記第5発明および第6発明にあっては、前記摂動モデル操作量は、少なくとも前記差
- 25       に応じて決定される第1操作量成分と、少なくとも前記要求値及び前記許容範囲に基づき決定される第2操作量成分とを含み、前記摂動モデル

操作量を決定する手段は、前記第2操作量成分を前記要求値に一致させて前記第1操作量成分と共に前記摂動モデルに入力したと仮定した場合に決定される目標運動の目標瞬時値に対応する前記制限対象量の推定値を求める手段と、その求めた制限対象量の推定値を前記許容範囲と比較し、その比較に基づき該許容範囲内に制限してなる制限済制限対象量を決定する手段と、少なくとも該制限済制限対象量に基づき前記第2操作量成分を決定する手段とを備える（第12発明）。

すなわち、第12発明では、前記摂動モデル操作量を決定するとき、まず、前記仮瞬時値誤差だけを考慮した第1操作量成分（これは基本的には、仮瞬時値誤差が安定になるまたは0に近づくように決定する）と、前記許容範囲を考慮せずに（制限対象量の許容範囲が無いものと仮定して）、前記要求値に一致させた第2操作量成分とを、摂動モデルに入力したと仮定した場合に決定される目標運動の目標瞬時値に対応する前記制限対象量の推定値が求められる。そして、この制限対象量の推定値を許容範囲内に制限してなる制限済制限対象量を決定した上で、少なくともその制限済制限対象量に基づき第2操作量成分が決定される。これにより、制限対象量を許容範囲内に収め、且つ摂動モデルを安定な状態にするために必要な第2操作量成分が適正に決定される。そして、このように決定された第2操作量成分と前記第1操作量成分とが摂動モデルに入力されることで、前記仮瞬時値誤差を安定化すると共に摂動モデルの安定性を確保しつつ、制限対象量を許容範囲内に収め得る目標運動の仮瞬時値の補正量、すなわち、適正な補正量を該摂動モデルから出力することができる。

上記第11発明あるいは第12発明では、前記制限対象量が、前記摩擦成分を含んでいるときには、前記摂動モデル操作量を決定する手段は、前記制限対象量の推定値を求めるために前記モデル床反力瞬時値と

して前記動力学モデルにより求められる並進床反力水平成分の瞬時値又は並進床反力の床面平行成分の瞬時値を用いることが好ましい（第13発明）。これによれば、前記制限対象量としての摩擦力成分の推定値（許容範囲を無視して、前記仮瞬時値誤差や要求値のみを考慮した制限対象量）を適正に求めることができ、ひいては、信頼性の高い制限済制限対象量（摩擦力成分を許容範囲内に制限したもの）を決定できる。

また、前記第12発明あるいはこれを必要要件とする第13発明では、前記摂動モデルが、前記ロボットの上体の並進運動と、該ロボットの上体の姿勢変化運動とを含むモデルであると共に、前記制限対象量が、前記ロボットに作用する摩擦力成分と、床反力モーメント又はZMPとからなるときには、前記制限済制限対象量を決定する手段は、前記第2操作量成分のうち、前記上体の姿勢変化運動に対応する操作量成分の前記要求値からの変化が最小になり、且つ、各制限済制限対象量の前記推定値からの変化が最小になるように各制限済制限対象量を決定することが好ましい（第14発明）。

すなわち、前記第10発明に関して説明した如く、前記制限対象量が前記摩擦力成分と、床反力モーメント又はZMPとからなるときには、複数の摂動運動を含む摂動モデル、例えば、上体の並進運動と上体の姿勢変化運動とを含むモデルであることが好ましいが、制限対象量を許容範囲内に収めるために、上体の姿勢変化運動の摂動を多くすると、上体の姿勢が大きく変動し易い。従って、前記第2操作量成分のうち、上体姿勢変化運動に対応する操作量成分は、できるだけ要求値に近いことが望ましい。そこで、第14発明では、前記第2操作量成分のうち、前記上体の姿勢変化運動に対応する操作量成分の前記要求値からの変化が最小になり、且つ、各制限済制限対象量の前記推定値からの変化が最小になるように各制限済制限対象量を決定する。これにより、上体の姿勢変

化運動の変化をできるだけ抑えるとともに摂動モデルの安定性をできるだけ確保しつつ、制限対象量を許容範囲に収めることが可能な目標運動の目標瞬時値を決定できる。

なお、前記第11～第14発明では、前記目標瞬時値決定手段は、前記制限対象量に対応する床反力を前記目標床反力の目標瞬時値として決定する（第15発明）。これにより、前記目標運動の目標瞬時値に対して、前記動力学モデル上で発生する慣性力と重力との合力に釣り合う目標床反力の目標瞬時値を決定できる。

また、前記第1～第10発明では、前記目標瞬時値決定手段は、前記目標運動の仮瞬時値を補正するための補正量を前記動力学モデルに追加的に入力する手段と、前記モデル床反力瞬時値に対応する前記制限対象量が前記許容範囲内の値に略維持され、且つ前記差が安定するように前記補正量を決定する手段とを備えるようにしてもよい（第16発明）。

これによれば、前記動力学モデルには、前記目標運動の仮瞬時値に加えて、該仮瞬時値を補正するための補正量が追加的に入力されるので、該動力学モデルの出力である前記モデル床反力瞬時値は、補正後の目標運動に対して、該動力学モデル上で動力的平衡条件を満たすものとなる。従って、モデル床反力瞬時値に対応する前記制限対象量が前記許容範囲内の値に略維持され、且つ前記差が安定するように前記補正量を決定することにより、動力的平衡条件を精度よく満たしつつ、制限対象量を許容範囲に収め得る目標運動の目標瞬時値を決定できることとなる。なお、この場合、目標運動の仮瞬時値を上記補正量により補正したもの、すなわち、目標運動の目標瞬時値を動力学モデルに入力すればよい。

また、摂動モデルを備える前記第4発明では、上記第16発明のように前記目標瞬時値決定手段に、前記目標運動の補正量を、前記動力学モデルに追加的に入力する手段を備えた場合には、前記摂動モデル操作量

は、少なくとも前記差（仮瞬時値誤差）に応じて決定される第1操作量成分と、少なくとも前記許容範囲に基づき決定される第2操作量成分とを含む。そして、前記摂動モデル操作量を決定する手段は、前記第1操作量成分のみを前記摂動モデルに入力したと仮定した場合に前記動力学

5 モデルが出力するモデル床反力瞬時値に対応する前記制限対象量の推定値を求める手段と、その求めた制限対象量の推定値を前記許容範囲と比較し、その比較に基づき該許容範囲内に制限してなる制限済制限対象量を決定する手段と、少なくとも該制限済制御対象量に基づき前記第2操作量成分を決定する手段とを備える（第17発明）。

- 10 これにより、前記第11発明と同様に、制限対象量を許容範囲内に収めるために必要な第2操作量成分が適正に決定される。そして、このように決定された第2操作量成分と前記第1操作量成分とが摂動モデルに入力されることで、前記仮瞬時値誤差を安定化しつつ、動力学モデルが出力するモデル床反力瞬時値に対応する制限対象量を許容範囲内に収め
- 15 得る目標運動の仮瞬時値の補正量、すなわち、適正な補正量を該摂動モデルから出力することができる。

- また、特に、摂動モデルに対する前記要求値を有する前記第5発明および第6発明にあっては、第16発明と同様に前記目標瞬時値決定手段に、前記目標運動の補正量を前記動力学モデルに追加的に入力する手段
- 20 を備えた場合には、前記摂動モデル操作量は、少なくとも前記差に応じて決定される第1操作量成分と、少なくとも前記要求値及び許容範囲に基づき決定される第2操作量成分とを含む。そして、前記摂動モデル操作量を決定する手段は、前記第2操作量成分を前記要求値に一致させて前記第1操作量と共に前記摂動モデルに入力したと仮定した場合に前記
- 25 動力学モデルが出力するモデル床反力瞬時値に対応する前記制限対象量の推定値を求める手段と、その求めた制限対象量の推定値を前記許容範

囲と比較し、その比較に基づき該許容範囲内に制限してなる制限済制限対象量を決定する手段と、少なくとも該制限済制御対象量に基づき前記第2操作量成分を決定する手段とを備える（第18発明）。

これによれば、前記第12発明と同様に、制限対象量を許容範囲内に  
5 収め、且つ摂動モデルを安定な状態にするために必要な第2操作量成分が適正に決定される。そして、このように決定された第2操作量成分と前記第1操作量成分とが摂動モデルに入力されることで、前記仮瞬時値誤差を安定化すると共に摂動モデルの安定性を確保しつつ、制限対象量を許容範囲内に収め得る目標運動の仮瞬時値の補正量、すなわち、適正  
10 な補正量を該摂動モデルから出力することができる。

上記第17発明又は第18発明においては、前記第2操作量成分が前記床反力モーメント又はZMPを含むと共に、前記差（仮瞬時値誤差）が少なくとも該床反力モーメント又はZMPに係わる差を含む場合には、前記摂動モデル操作量を決定する手段は、前記差（仮瞬時値誤差）の  
15 うちの床反力モーメント又はZMPと、前記第2操作量成分の床反力モーメント又はZMPとが略等しくなるように前記第1操作量成分を決定する手段を備えることが好ましい（第19発明）。

これによれば、仮瞬時値誤差の床反力モーメント又はZMPを好適に安定化できるような目標運動の目標瞬時値を決定できる。

20 さらに、前記第17～第19発明では、前記制限対象量が、前記摩擦力成分を含んでいる場合には、前記摂動モデル操作量を決定する手段は、前記第13発明と同様に、前記制限対象量の推定値を求めるために前記モデル床反力瞬時値として前記動力学モデルにより求められる並進床反力水平成分の瞬時値又は並進床反力の床面平行成分の瞬時値を用いるこ  
25 とが好ましい（第20発明）。これによれば、前記第13発明と同様に、前記制限対象量としての摩擦力成分の推定値（許容範囲を無視して、前

記仮瞬時値誤差や要求値のみを考慮した制限対象量)を適正に求めることができ、ひいては、信頼性の高い制限済制限対象量(摩擦力成分を許容範囲内に制限したもの)を決定できる。

また、前記第18発明あるいは、これを必要要件とする第19～第20発明においては、前記摂動モデルが、前記ロボットの上体の並進運動と、該ロボットの上体の姿勢変化運動とを含むモデルであると共に、前記制限対象量が、前記摩擦力成分と、床反力モーメント又はZMPとからなる場合には、前記第14発明と同様に、前記制限済制限対象量を決定する手段は、前記第2操作量成分のうち、前記上体の姿勢変化運動に対応する操作量成分の前記要求値からの変化が最小になり、且つ、各制限済制限対象量の前記推定値からの変化が最小になるように各制限済制限対象量を決定することが好ましい(第21発明)。

これによれば、前記第14発明と同様に、上体の姿勢変化運動の変化をできるだけ抑えるとともに摂動モデルの安定性をできるだけ確保しつつ、制限対象量を許容範囲に収めることが可能な目標運動の目標瞬時値を決定できる。

なお、第16～第21発明においては、前記目標瞬時値決定手段は、前記モデル床反力瞬時値を前記目標床反力の目標瞬時値として決定する(第22発明)。すなわち、前述したように、第16～第21発明では、前記動力学モデルには、前記目標運動の仮瞬時値に加えて、該仮瞬時値を補正するための補正量が追加的に入力されるので、該動力学モデルの出力である前記モデル床反力瞬時値は、補正後の目標運動に対して、該動力学モデル上で動学的平衡条件を満たすものとなる。従って、前記モデル床反力瞬時値を前記目標床反力の目標瞬時値として決定することで、前記目標運動の目標瞬時値に対して、前記動力学モデル上で発生する慣性力と重力との合力に釣り合う目標床反力の目標瞬時値を決定でき



る。

次に、本願の第23発明は、上体から延設された複数の脚体を運動させて移動する脚式移動ロボットの目標歩容を生成する歩容生成装置において、前記ロボットに作用する摩擦力成分と、床反力モーメント又はZ  
5 MPとのうちの少なくともいずれかを制限対象量とし、該制限対象量の許容範囲を設定する許容範囲設定手段と、前記目標歩容を構成する目標運動及び目標床反力のうちの少なくとも目標床反力の仮瞬時値を逐次決定する目標床反力仮瞬時値決定手段と、少なくとも該目標床反力の仮瞬時値を、前記ロボットの運動と床反力との関係を表す第1動力学モデル  
10 に入力し、該第1動力学モデルの出力としての目標運動の仮瞬時値を求める第1モデル演算手段と、少なくとも前記目標運動の仮瞬時値を、前記ロボットの運動と床反力との関係を表す第2動力学モデルに入力し、該第2動力学モデルの出力としてのモデル床反力瞬時値を求める第2モデル演算手段と、少なくとも該モデル床反力瞬時値と前記目標床反力の  
15 仮瞬時値との差と、前記許容範囲とに基づき、前記第2動力学モデルが出力する前記モデル床反力瞬時値に対応する前記制限対象量が前記許容範囲内に収まるように前記目標床反力の補正量を求め、その求めた補正量を前記第1動力学モデルに追加的に入力する第1モデル入力補正手段とを備え、少なくとも前記第2動力学モデルの入力に基づいて前記目標  
20 運動の目標瞬時値を決定することを特徴とするものである。

かかる第23発明では、目標床反力の仮瞬時値を入力として、目標運動の仮瞬時値を出力する第1動力学モデルと、この第1動力学モデルの出力（目標運動の仮瞬時値）を入力としてモデル床反力瞬時値を出力する第2動力学モデルとの2つの動力学モデルが備えられる。そして、第  
25 2動力学モデルの出力であるモデル床反力瞬時値と第1動力学モデルの入力である目標床反力の仮瞬時値との差が、前記第1発明に関して説明

した場合と同様に、第2モデルに入力される目標運動および目標床反力の仮瞬時値の動力学的平衡条件からの誤差を表す仮瞬時値誤差として得られる。ただし、第23発明を必要要件とする後述の第27～第39発明においては、第2モデルに入力される目標運動は、該目標運動の仮瞬時値を補正したものなので、厳密な意味での誤差ではないが、便宜上誤差と呼ぶ。そして、少なくともこの仮瞬時値誤差と前記制限対象量の許容範囲とに基づいて、前記第2動力学モデルが出力する前記モデル床反力瞬時値に対応する前記制限対象量（前記摩擦力成分又はZMP又は床反力モーメント）が前記許容範囲内に収まるように前記目標床反力の補正量を求め、その求めた補正量を前記第1動力学モデルに追加的に入力するので、第1動力学モデルから、前記仮瞬時値誤差を安定化しつつ、制限対象量を許容範囲内に収め得るような目標運動の瞬時値を出力させることができるようになる。従って、第2動力学モデルの入力に基づいて目標運動の目標瞬時値を決定することで、前記制限対象量が許容範囲内に収まるような目標歩容の目標瞬時値を得ることができる。この場合、第1動力学モデルの出力は、前記目標床反力の補正量によって操作されることとなるので、第1動力学モデルは、さほど近似精度の高いものである必要はない。従って、この第1動力学モデルの演算を行なう前記第1モデル演算手段の演算量を低減できる。また、第2動力学モデルの演算を行なう第2モデル演算手段では、前記第1発明におけるモデル演算手段と同様に、少なくとも目標運動の仮瞬時値（脚体先端部の位置姿勢等の瞬時値）を入力として、モデル床反力瞬時値（目標運動の仮瞬時値に対応して、前記動力学モデル上で慣性力と重力との合力に釣り合う床反力の瞬時値）を求めるだけであるので、前記第2動力学モデルが比較的厳密なものであっても、比較的少ない演算量でモデル床反力瞬時値を求めることができる。その結果、第23発明によれば、第1発明と同様

に、前記制限対象量が許容範囲内に収まるような目標歩容の目標瞬時値を比較的少ない演算量で決定することができる。また、前記摩擦成分等の制限対象量が許容範囲内に収まるような目標歩容の目標瞬時値を決定できることで、通常の歩行以外にも、走行や低摩擦係数床面での歩行など、多様な目標歩容を適正に生成することができる。

なお、前記第1動力学モデルは、基本的には、近似精度が比較的低いものでよいが、第2動力学モデルは、近似精度が比較的高いものを用いることが好適である。これにより、動力学平衡条件を精度よく満足し得る目標歩容を生成できる。

かかる第23発明では、前記第2モデル演算手段が求めるモデル床反力瞬時値は少なくとも床反力モーメント又はZMPのモデル値を含むと共に、前記仮瞬時値決定手段が決定する前記目標床反力の仮瞬時値は少なくとも床反力モーメント又はZMPの仮目標瞬時値を含み、前記第1モデル入力補正手段が用いる前記差は、前記床反力モーメント又はZMPのモデル値と、該床反力モーメント又はZMPの仮目標瞬時値との差であることが好ましい（第24発明）。これによれば、前記第2発明と同様に、前記仮瞬時値誤差が、動力学的平衡条件に対する誤差を表すものとしての信頼性が高まり、ひいては、動力学的平衡条件を精度良く満足し得る目標歩容を生成できる。

また、上記第23および第24発明では、前記目標瞬時値決定手段は、前記第2動力学モデルが出力する前記モデル床反力瞬時値を前記目標床反力の目標瞬時値として決定する（第25発明）。すなわち、第2動力学モデルには、前記制限対象量を許容範囲内に収め得る適正な目標運動の目標瞬時値が入力されることとなるので、前記第22発明の場合と同様に、第2動力学モデルの出力である前記モデル床反力瞬時値は、目標運動の目標瞬時値に対して、第2動力学モデル上で動力学的平衡条件を

満たすものとなる。従って、前記モデル床反力瞬時値を前記目標床反力の目標瞬時値として決定することで、前記目標運動の目標瞬時値に対して、第2動力学モデル上で発生する慣性力と重力との合力に釣り合う目標床反力の目標瞬時値を決定できる。

- 5        また、第23～第25発明では、前記目標床反力の補正量の要求値を決定する手段を備え、前記第1モデル入力補正手段が求める前記目標床反力の補正量は、少なくとも前記差に応じて決定される第1補正量成分と、少なくとも前記要求値及び許容範囲に基づき決定される第2補正量成分とを含み、前記第1モデル入力補正手段は、前記第2補正量成分を
- 10    前記要求値に一致させて前記第1補正量成分と共に前記第1動力学モデルに追加的に入力したと仮定した場合に前記第2動力学モデルが出力するモデル床反力瞬時値に対応する前記制限対象量の推定値を求める手段と、その求めた制限対象量の推定値を前記許容範囲と比較し、その比較に基づき該許容範囲に制限してなる制限済制限対象量を決定する手段と、
- 15    少なくとも該制限済制限対象量に基づき前記第2補正量成分を決定する手段とを備えることが好ましい（第26発明）。

- すなわち、第26発明では、前記第1動力学モデルに入力する前記目標床反力の補正量を決定するとき、まず、前記仮瞬時値誤差だけを考慮した第1補正量成分（これは基本的には、仮瞬時値誤差が安定になるよ
- 20    うに決定する）と、前記許容範囲を考慮せずに（制限対象量の許容範囲が無いものと仮定して）、前記要求値に一致させた第2補正量成分とを、前記第1動力学モデルに追加的に入力したと仮定した場合に決定される目標運動の目標瞬時値に対応する前記制限対象量の推定値が求められる。そして、この制限対象量の推定値を許容範囲内に制限してなる制限済制限対象量を決定した上で、少なくともその制限済制限対象量に基づき第
- 25    2補正量成分を決定する。これにより、制限対象量を許容範囲内に収め

るために必要な第2補正量成分が適正に決定される。そして、このように決定された第2補正量成分と前記第1補正量成分とが第1動力学モデルに追加的に入力されることで、前記仮瞬時値誤差を安定化すると共に制限対象量を許容範囲内に収め得る目標運動の瞬時値を第1動力学モデルから第2動力学モデルに入力することができる。

また、第23～第25発明では、少なくとも前記差（仮瞬時値誤差）と前記許容範囲とに基づき前記目標運動の補正量を求め、その求めた補正量を前記第2動力学モデルに追加的に入力する第2モデル入力補正手段を備えてもよい（第27発明）。これによれば、第1動力学モデルの安定性を高めつつ、動力学精度を高め得る目標歩容を生成できる。

この第27発明では、前記ロボットの摂動運動と摂動床反力との関係を表す摂動モデルと、少なくとも前記差と前記許容範囲とに基づき床反力操作量を決定する手段と、その決定した床反力操作量を、前記第1動力学モデルに入力する前記目標床反力の補正量と前記摂動モデルに入力する摂動モデル操作量とに分配する分配手段とを備え、前記第2モデル入力補正手段は、前記摂動モデル操作量を前記摂動モデルに入力することにより前記目標運動の補正量を求めることが好適である（第28発明）。

これによれば、前記床反力操作量を前記第1動力学モデルに入力する前記目標床反力の補正量と前記摂動モデルに入力する摂動モデル操作量とに分配するので、第1動力学モデルと摂動モデルとのそれぞれの特性に適した入力をそれぞれのモデルに入力することができ、第1動力学モデルや、摂動モデルが不安定になるのを防止しつつ、前記仮瞬時値誤差を安定化し、且つ制限対象量を許容範囲内に収め得る目標運動の目標瞬時値を決定できる。また、摂動モデルを用いることで、第2動力学モデルに追加的に入力する目標運動の補正量の算出が容易になる。

なお、床反力操作量を前記第 1 動力学モデルに入力する前記目標床反力の補正量と前記摂動モデルに入力する摂動モデル操作量とに分配する場合、基本的には、第 1 動力学モデルには、床反力操作量の大局的な変動分（直流的な変動分等）を分配することが好ましく、摂動モデルには、  
5 局所的な変動分（微小な変動分等）を分配することが好適である。

このように摂動モデルを備える第 28 発明では、少なくとも前記摂動モデルの状態量に応じて前記床反力操作量の要求値を決定する手段を備え、前記床反力操作量を決定する手段は、前記差（仮瞬時値誤差）、前記許容範囲、及び前記要求値に基づき前記分配手段に与える床反力操作  
10 量を決定することが好ましい（第 29 発明）。

これによれば、前記第 5 発明と同様に、前記仮瞬時値誤差や許容範囲だけでなく、摂動モデルの状態量（摂動モデルの要素としての質点や回転体の位置や回転角、あるいはそれらの変化速度等）の要求値を考慮して、前記分配手段に入力する床反力操作量が決定されるので、摂動モデルの挙動の安定性を高め、ひいては、該摂動モデルにより不適正な目標運動の補正量が求められてしまうような事態を防止できる。  
15

さらに、上記第 29 発明では、前記床反力操作量の要求値を前記摂動モデルの状態量と該状態量に対する目標値との偏差に応じたフィードバック制御則により逐次決定する手段を備えることが好ましい（第 30 発  
20 明）。これによれば、前記第 6 発明と同様に、摂動モデルの挙動の安定性をより確実に高めることができる。

また、上記第 28～第 30 発明では、前記摂動モデルは、前記摂動運動に対する並進床反力水平成分と床反力モーメントとの摂動比率が互いに異なる複数の摂動運動を含むモデルであり、前記床反力操作量は各摂  
25 動運動にそれぞれ対応する複数の操作量からなると共に、前記第 2 モデル入力補正手段が求める前記目標運動の補正量は、各摂動運動にそれぞれ

れ対応する複数の補正量からなることが好ましい（第31発明）。

これによれば、前記第7発明と同様に、前記目標運動の仮瞬時値を補正するためにロボットの複数種の摂動運動を操作できるため、制限対象量の許容範囲の広さ等によらずに、制限対象量を許容範囲に収め得る目標運動の目標瞬時値を決定できる。

さらに、この第31発明では、前記複数の摂動運動は、前記ロボットの上体の並進運動と、該ロボットの重心を略一定に維持しつつロボットの所定の部位の姿勢を変化させる姿勢変化運動とからなること好適である（第32発明）。これによれば、前記第8発明と同様に、前記上体の並進運動と姿勢変化運動との合成によって所望の床反力（制限対象量が許容範囲に収まるような床反力）を発生し得る目標運動の目標瞬時値を決定できる。

あるいは、第31発明では、前記複数の摂動運動は、前記ロボットの上体の並進水平運動と、該ロボットの上体の姿勢変化運動とからなることが好ましい（第33発明）。

これによれば、前記第9発明と同様に、目標運動の仮瞬時値の補正量を小さくでき、目標歩容におけるロボットの姿勢の安定性を高めることができる。

また、上記第31～第33発明は、前記制限対象量は、前記ロボットに作用する摩擦力成分と、床反力モーメント又はZMPとからなる場合に好適である（第34発明）。

これによれば、前記第10発明と同様に、ロボットの走行や、低摩擦係数の床面での歩行等、多種多様な条件下での目標歩容を適正に生成できる。

前記摂動モデルを備えた前記第28発明にあっては、より具体的には、例えば前記床反力操作量は、少なくとも前記差に応じて決定される第1

操作量成分と、少なくとも前記許容範囲に基づき決定される第2操作量成分とを含み、前記床反力操作量を決定する手段は、前記第1操作量成分のみを前記分配手段に入力したと仮定した場合に前記第2動力学モデルが出力するモデル床反力瞬時値に対応する前記制限対象量の推定値を  
5 求める手段と、その求めた制限対象量の推定値を前記許容範囲と比較し、その比較に基づき該許容範囲内に制限してなる制限済制限対象量を決定する手段と、少なくとも該制限済制御対象量に基づき前記第2操作量成分を決定する手段とを備える（第35発明）。

すなわち、第35発明では、前記床反力操作量を決定するとき、まず、  
10 前記許容範囲を考慮せずに（制限対象量の許容範囲が無いものと仮定して）前記仮瞬時値誤差だけを考慮した第1操作量成分（これは基本的には、仮瞬時値誤差が安定になるように決定する）のみを、前記分配手段に入力したと仮定した場合に前記第2動力学モデルが出力するモデル床反力瞬時値に対応する前記制限対象量の推定値が求められる。そして、  
15 この制限対象量の推定値を許容範囲内に制限してなる制限済制限対象量を決定した上で、少なくともその制限済制限対象量に基づき第2操作量成分が決定される。これにより、制限対象量を許容範囲内に収めるために必要な第2操作量成分が適正に決定される。そして、このように決定された第2操作量成分と前記第1操作量成分とを含む床反力操作量が、  
20 分配手段に入力され、第1動力学モデルへの目標床反力の補正量と、摂動モデルへの摂動モデル操作量とに分配されることで、第1動力学モデルや摂動モデルの安定性を高めると共に前記仮瞬時値誤差を安定化しつつ、制限対象量を許容範囲内に収め得る目標運動の目標瞬時値を第2動力学モデルに入力することができる。

25 なお、前記制限済制限対象量を決定する場合、基本的には、制限対象量の推定値にできるだけ近く、且つ許容範囲に存在するような値を制限



済制限対象量として決定することが好ましい。

また、特に、摂動モデルに対する要求値を有する前記第29発明および第30発明においては、前記床反力操作量は、少なくとも前記差に応じて決定される第1操作量成分と、少なくとも前記要求値及び許容範囲に基づき決定される第2操作量成分とを含み、前記床反力操作量を決定する手段は、前記第2操作量成分を前記要求値に一致させて前記第1操作量成分と共に前記分配手段に入力したと仮定した場合に前記第2動力学モデルが出力するモデル床反力瞬時値に対応する前記制限対象量の推定値を求める手段と、その求めた制限対象量の推定値を前記許容範囲と比較し、その比較に基づき該許容範囲内に制限してなる制限済制限対象量を決定する手段と、少なくとも該制限済制御対象量に基づき前記第2操作量成分を決定する手段とを備える（第36発明）。

すなわち、第36発明では、前記床反力操作量を決定するとき、まず、前記仮瞬時値誤差だけを考慮した第1操作量成分（これは基本的には、仮瞬時値誤差が安定になるように決定する）と、前記許容範囲を考慮せずに（制限対象量の許容範囲が無いものと仮定して）、前記要求値に一致させた第2操作量成分とを、分配手段に入力したと仮定した場合に前記第2動力学モデルが出力するモデル床反力瞬時値に対応する前記制限対象量の推定値が求められる。そして、この制限対象量の推定値を許容範囲内に制限してなる制限済制限対象量を決定した上で、少なくともその制限済制限対象量に基づき第2操作量成分が決定される。これにより、制限対象量を許容範囲内に収め、且つ摂動モデルを確実に安定な状態にするために必要な第2操作量成分が適正に決定される。そして、このように決定された第2操作量成分と前記第1操作量成分とを含む床反力操作量が、分配手段に入力され、第1動力学モデルへの目標床反力の補正量と、摂動モデルへの摂動モデル操作量とに分配されることで、第1動

力学モデルや摂動モデルの安定性を高めると共に前記仮瞬時値誤差を安定化しつつ、制限対象量を許容範囲内に収め得る目標運動の目標瞬時値を第2動力学モデルに入力することができる。

上記第35発明あるいは第36発明では、前記制限対象量が前記床反力モーメント又はZMPを含むと共に、前記差（仮瞬時値誤差）が少なくとも該床反力モーメント又はZMPに係わる差を含む場合には、前記摂動モデル操作量を決定する手段は、前記差（仮瞬時値誤差）のうちの床反力モーメント又はZMPと、前記制限済制限対象量の床反力モーメント又はZMPとが略等しくなるように前記第1操作量成分を決定する手段を備えることが好ましい（第37発明）。

これによれば、前記第19発明と同様に、仮瞬時値誤差の床反力モーメント又はZMPを好適に安定化できるような目標運動の目標瞬時値を決定できる。

さらに、前記第35～第37発明では、前記制限対象量が、前記摩擦力成分を含んでいる場合には、前記床反力操作量を決定する手段は、前記制限対象量の推定値を求めるために、前記モデル床反力瞬時値として前記動力学モデルにより求められる並進床反力水平成分の瞬時値又は並進床反力の床面平行成分の瞬時値を用いることが好ましい（第38発明）。これによれば、前記第20発明と同様に、前記制限対象量としての摩擦力成分の推定値（許容範囲を無視して、前記仮瞬時値誤差や要求値のみを考慮した制限対象量）を適正に求めることができ、ひいては、信頼性の高い制限済制限対象量（摩擦力成分を許容範囲内に制限したもの）を決定できる。

また、前記第36発明、あるいはこれを必要要件とする第37発明、第38発明では、前記摂動モデルが、前記ロボットの上体の並進運動と、該ロボットの上体の姿勢変化運動とを含むモデルであると共に、前記制

限対象量が、前記摩擦力成分と、床反力モーメント又はZMPとからなるときには、前記制限済制限対象量を決定する手段は、前記第2操作量成分のうち、前記上体の姿勢変化運動に対応する操作量成分の前記要求値からの変化が最小になり、且つ、各制限済制限対象量の前記推定値からの変化が最小になるように各制限済制限対象量を決定することが好ましい（第39発明）。これによれば、前記第14発明や、第21発明と同様に、上体の姿勢変化運動の変化をできるだけ抑えるとともに摂動モデルの安定性をできるだけ確保しつつ、制限対象量を許容範囲に収めることが可能な目標運動の目標瞬時値を決定できる。

- 10 次に、本願の第40発明は、上体から延設された複数の脚体を運動させて移動する脚式移動ロボットの目標歩容を生成する歩容生成装置において、前記ロボットに作用する摩擦力成分と、床反力モーメント又はZMPとのうちの少なくともいずれかを制限対象量とし、該制限対象量の許容範囲を設定する許容範囲設定手段と、前記目標歩容を構成する目標
- 15 運動及び目標床反力のうちの少なくとも目標床反力の仮瞬時値を逐次決定する目標床反力仮瞬時値決定手段と、少なくとも該目標床反力の仮瞬時値を、前記ロボットの運動と床反力との関係を表す第1動力学モデルに入力し、該第1動力学モデルの出力としての目標運動の第1仮瞬時値を求める第1モデル演算手段と、少なくとも前記目標床反力の仮瞬時値
- 20 を、前記ロボットの運動と床反力との関係を表す第2動力学モデルに入力し、該第2動力学モデルの出力としての目標運動の第2仮瞬時値を、該目標運動の第2仮瞬時値によって発生するロボットの慣性力と重力との合力に前記第2動力学モデル上で略釣り合う床反力瞬時値に対応する前記制限対象量が前記許容範囲内に収まるように求める第2モデル演算
- 25 手段と、少なくとも前記目標運動の第1仮瞬時値と第2仮瞬時値との差に基づいて、該差が零に近づくように床反力操作量を求める操作量算出

手段と、該床反力操作量を前記第1動力学モデル及び第2動力学モデルのうちの少なくともいずれか一方に追加的に入力するモデル入力補正手段とを備え、前記目標運動の第2仮瞬時値を該目標運動の目標瞬時値として決定することを特徴とするものである。

- 5       かかる第40発明では、目標床反力の仮瞬時値を入力として、目標運動の仮瞬時値（第1仮瞬時値および第2仮瞬時値）をそれぞれ出力する第1動力学モデルおよび第2動力学モデルが備えられる。この場合、第2動力学モデルの演算では、制限対象量の許容範囲が考慮され、目標運動の第2仮瞬時値によって発生するロボットの慣性力と重力との合力に
- 10   第2動力学モデル上で略釣り合う床反力瞬時値に対応する前記制限対象量が前記許容範囲内に収まるように、目標運動の第2仮瞬時値が求められる。そして、少なくとも前記目標運動の第1仮瞬時値と第2仮瞬時値との差に基づいて、該差が零に近づくように床反力操作量が求められ、この床反力操作量が前記第1動力学モデル及び第2動力学モデルのうちの
- 15   の少なくともいずれか一方に追加的に入力される。さらに、前記目標運動の第2仮瞬時値が該目標運動の目標瞬時値として決定される。

- この場合、基本的には、第1動力学モデルは比較的動力学的な近似精度の低いものでよく、また、第2動力学モデルは、第1動力学モデルよりも動力学的な近似精度が高いものであればよい。このため、それぞれの
- 20   動力学モデルの演算を行なう前記第1モデル演算手段と第2モデル演算手段とは、それぞれ比較的少ない演算量でそれぞれの動力学モデルの出力を演算できる。そして、前記目標運動の第1仮瞬時値と第2仮瞬時値との差が零に近づくように求めた床反力操作量を第1動力学モデル及び第2動力学モデルのうちの少なくともいずれか一方に追加的に入力す
- 25   るので、前記第2動力学モデルが出力する目標運動の第2仮瞬時値が、前記制限対象量を許容範囲に収めつつ、安定性の高いものとなり、目標

運動の目標瞬時値として好適なものとなる。その結果、通常の歩行以外にも、走行や低摩擦係数床面での歩行などの多様な目標歩容を、比較的少ない演算量で生成することが可能となる。

かかる第40発明では、前記目標運動の第1仮瞬時値と第2仮瞬時値との差は、前記ロボットの所定の部位の位置の差を含み、又は、該ロボットの重心の位置の差と該ロボットの所定の部位の姿勢の差とを含むことが好ましい（第41発明）。これによれば、前記所定の部位の位置姿勢や、ロボットの重心位置がロボットの安定性を損なうような状態になったりすることを防止して、目標運動の目標瞬時値によるロボットの安定性を高めることができる。なお上記所定の部位としては、ロボットの  
5 上体が好適である。

上述のような第40発明は、例えば前記第26発明の構成を用いることで、容易に実現できる。すなわち、前記第26発明において、前記目標床反力の補正量の要求値を決定する手段を除いたものが、前記第40  
15 発明における前記第2モデル演算手段の処理に相当するものとなる。そこで、第26発明において、少なくとも前記目標床反力の仮瞬時値を、前記ロボットの運動と床反力との関係を表す第3動力学モデルに入力し、該第3動力学モデルの出力としての目標運動の第3仮瞬時値を求める第3モデル演算手段を備え、前記目標床反力の補正量の要求値を決定する  
20 手段は、前記決定した前記目標運動の目標瞬時値と前記目標運動の第3仮瞬時値との差に基づいて、該差が零に近づくように前記要求値を決定する（第42発明）。

かかる第42発明では、上記第3動力学モデルと第3モデル演算手段とが、それぞれ第40発明における第1動力学モデル、第1モデル演算  
25 手段に相当するものとなる。従って、第42発明は、第40発明と同等のものとなり、第40発明と同様の効果を奏することができる。

## 図面の簡単な説明

図1は本発明の実施形態における脚式移動ロボットとしての2足移動ロボットの全体的構成の概略を示す概略図、図2は図1のロボットの各脚体の足平部分の構成を示す側面図、図3は図1のロボットに備えた制御ユニットの構成を示すブロック図、図4は図3の制御ユニットの機能的構成を示すブロック図、図5は図1のロボットの走行歩容を例示する説明図、図6は目標床反力鉛直成分の設定例を示す線図、図7は目標ZMPの設定例を示す線図、図8は歩容生成装置の要部構成を機能的に示すブロック図、図9及び図10はロボットの運動モード（上体並進モード及び上体回転モード）の説明図、図11及び図12はロボットの動力学モデルの説明図である。図13は図3の制御ユニットに備えた歩容生成装置のメインルーチン処理を示すフローチャート、図14はロボットの上体位置の発散状態を示す説明図、図15は図13のフローチャートサブルーチン処理を示すフローチャート、図16は定常歩容足平着地位置姿勢及び座標系の関係を示す説明図、図17は定常歩容の目標床反力鉛直成分の設定例を示す線図、図18は定常歩容の床反力水平成分許容範囲の設定例を示す線図、図19は定常歩容の目標ZMPの設定例を示す線図、図20は図13のフローチャートのサブルーチン処理を示すフローチャート、図21は図20のフローチャートのサブルーチン処理を示すフローチャート、図22は図21のフローチャートのサブルーチン処理を示すフローチャート、図23は図22のフローチャートのサブルーチン処理を示すフローチャートである。図24～図31は、図22のフローチャートの要部の処理を説明するための線図、図32は定常歩容における上体位置の軌道の例を示す説明図、図33は図13のフローチャートのサブルーチン処理を示すフローチャート、図34は今回歩容の床反力水平成分許容範囲の設定例を示す線図、図35は図13のフロー

チャートのサブルーチン処理を示すフローチャート、図36は図35の  
フローチャートのサブルーチン処理を示すフローチャート、図37は図  
36のフローチャートのサブルーチン処理を示すフローチャート、図3  
8は図37のフローチャートのサブルーチン処理を示すフローチャート、  
5 図39は図38のフローチャートの要部の処理を説明するための線図、  
図40は歩行時の床反力鉛直成分の設定例を示す線図である。図41は  
本発明の要部における歩容補正手法の分類を示す説明図、図42は本発  
明の第1実施形態における歩容補正手法を機能的に示すブロック図、図  
43および図44は摂動モデルの説明図、図45はZMP許容範囲の設  
10 定例を示す図、図46～図49は制限対象量（床反力水平成分および床  
反力モーメント）の制限手法の説明図である。図50は本発明の第2実  
施形態における歩容補正手法を機能的に示すブロック図、図51～図5  
7は図50のブロック図の機能の説明図、図58は本発明の第3実施形  
態の歩容補正手法を機能的に示すブロック図、図59は本発明の第4実  
15 施形態の歩容補正手法を機能的に示すブロック図、図60は本発明の第  
5実施形態に係る順動力学モデルの説明図、図61は本発明の第5実施  
形態における歩容補正手法を機能的に示すブロック図、図62はロボッ  
トの上体の鉛直位置の補正手法の他の例を機能的に示すブロック図、図  
63はロボットの運動のモードの他の例を示す説明図である。

20

発明を実施するための最良の形態

以下、添付図面を参照して本発明の実施形態に係る脚式移動ロボット  
の歩容生成装置及び制御装置を説明する。尚、本発明の実施形態では、  
脚式移動ロボットとしては2足移動ロボットを例にとる。

25 図1は、本実施形態に係る歩容生成装置及び制御装置が適用される脚  
式移動ロボットとしての2足移動ロボットの全体的構成の概略を示す概

略図である。

図示の如く、2足移動ロボット（以下、ロボットという）1は上体24から下方に延設された左右一对の脚体（脚部リンク）2, 2を備える。両脚体2, 2は同一構造であり、それぞれ6個の関節を備える。その6  
5 個の関節は上体24側から順に、股（腰部）の回旋（回転）用（上体24に対するヨー方向の回転用）の関節10R, 10L（符号R、Lはそれぞれ右側脚体、左側脚体に対応するものであることを意味する符号である。以下同じ）と、股（腰部）のロール方向（X軸まわり）の回転用の関節12R, 12Lと、股（腰部）のピッチ方向（Y軸まわり）の回  
10 転用の関節14R, 14Lと、膝部のピッチ方向の回転用の関節16R, 16Lと、足首のピッチ方向の回転用の関節18R, 18Lと、足首のロール方向の回転用の関節20R, 20Lとから構成される。

各脚体2の足首の2つの関節18R（L）, 20R（L）の下部には、各脚体2の先端部を構成する足平（足部）22R（L）が取着されると  
15 共に、両脚体2, 2の最上位には、各脚体2の股の3つの関節10R（L）, 12R（L）, 14R（L）を介して前記上体（基体）24が取り付けられている。上体24の内部には、詳細を後述する制御ユニット26などが格納されている。なお、図1では図示の便宜上、制御ユニット26を上体24の外部に記載している。

20 上記構成の各脚体2においては、股関節（あるいは腰関節）は関節10R（L）, 12R（L）, 14R（L）から構成され、膝関節は関節16R（L）から構成され、足関節（足首関節）は関節18R（L）, 20R（L）から構成される。また股関節と膝関節とは大腿リンク28R（L）で連結され、膝関節と足関節とは下腿リンク30R（L）で連結  
25 される。

尚、図示は省略するが、上体24の上部の両側部には左右一对の腕体



が取り付けられると共に、上体 24 の上端部には頭部が配置される。これらの腕体及び頭部は、本発明の要旨と直接的な関連を有しないので詳細な説明は省略するが、各腕体は、それに備える複数の関節によって、該腕体を上体 24 に対して前後に振る等の運動を行なうことが可能となっている。

各脚体 2 の上記構成により、各脚体 2 の足平 22 R (L) は、上体 24 に対して 6 つの自由度を与えられている。そして、ロボット 1 の移動に際して両脚体 2, 2 を合わせて  $6 * 2 = 12$  個 (この明細書で「\*」はスカラに対する演算においては乗算を示し、ベクトルに対する演算においては外積を示す) の関節を適宜な角度で駆動することで、両足平 22 R, 22 L の所望の運動を行なうことができる。これによりロボット 1 は任意に 3 次元空間を移動することができる。

尚、この明細書で後述する上体 24 の位置および速度は、上体 24 の所定位置、具体的には上体 24 のあらかじめ定めた代表点 (例えば左右の股関節の間の中央点等) の位置およびその移動速度を意味する。同様に、各足平 22 R, 22 L の位置及び速度は、各足平 22 R, 22 L のあらかじめ定めた代表点の位置及びその移動速度を意味する。この場合、本実施形態では各足平 22 R, 22 L の代表点は、例えば各足平 22 R, 22 L の底面上 (より具体的には各脚体 2 の足首関節の中心から各足平 22 R, 22 L の底面への垂線が該底面と交わる点等) に設定される。

図 1 に示す如く、各脚体 2 の足首関節 18 R (L), 20 R (L) の下方には足平 22 R (L) との間に公知の 6 軸力センサ 34 が介装されている。該 6 軸力センサ 34 は、各脚体 2 の足平 22 R (L) の着地の有無、および各脚体 2 に作用する床反力 (接地荷重) などを検出するためのものであり、該床反力の並進力の 3 方向成分  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$  並びにモーメントの 3 方向成分  $M_x$ ,  $M_y$ ,  $M_z$  の検出信号を制御ユニット

26に出力する。また、上体24には、Z軸（鉛直方向（重力方向））に対する上体24の傾き（姿勢角）とその角速度とを検出するための傾斜センサ36が設置され、その検出信号が該傾斜センサ36から制御ユニット26に出力される。また、詳細構造の図示は省略するが、ロボット1の各関節には、それを駆動するために電動モータ32（図3参照）と、その電動モータ32の回転量（各関節の回転角）を検出するためのエンコーダ（ロータリエンコーダ）33（図3参照）とが設けられ、該エンコーダ33の検出信号が該エンコーダ33から制御ユニット26に出力される。

10 図2に示すように、各足平22R（L）の上方には、前記6軸力センサ34との間にばね機構38が装備されると共に、足底（各足平22R（L）の底面）にはゴムなどからなる足底弾性体40が貼られている。これらのばね機構38及び足底弾性体40によりコンプライアンス機構42が構成されている。ばね機構38は具体的には、足平22R（L）  
15 の上面部に取り付けられた方形状のガイド部材（図示せず）と、足首関節18R（L）（図2では足首関節20R（L）を省略している）および6軸力センサ34側に取り付けられ、前記ガイド部材内に弾性材（ゴムやばね）を介して微動自在に収納されるピストン状部材（図示せず）とから構成されている。

20 図2に実線で表示された足平22R（L）は、床反力を受けていないときの状態を示している。各脚体2が床反力を受けると、コンプライアンス機構42のばね機構38と足底弾性体40とがたわみ、足平22R（L）は図中に点線で例示したような位置姿勢に移る。このコンプライアンス機構42の構造は、着地衝撃を緩和するためだけでなく、ロボット1の制御性を高めるためにも重要なものである。尚、その詳細は本出  
25 願人に先に提案した特開平5-305584号に記載されているので、

詳細な説明は省略する。

さらに、図1では図示を省略するが、ロボット1の外部には、該ロボット1の操縦用のジョイスティック（操作器）44（図3参照）が設けられ、そのジョイスティック44を操作することで、直進移動している  
5   ロボット1を旋回させるなど、ロボット1の歩容に対する要求を必要に応じて制御ユニット26に入力できるように構成される。この場合、入力できる要求は、例えばロボット1の移動時の歩容形態（歩行、走行等）、遊脚の着地位置姿勢や着地時刻、あるいはこれらの着地位置姿勢や着地時刻を規定する指令データ（例えばロボット1の移動方向、移動  
10   速度等）である。

図3は制御ユニット26の構成を示すブロック図である。該制御ユニット26はマイクロコンピュータにより構成されており、CPUからなる第1の演算装置60及び第2の演算装置62、A/D変換器50、カウンタ56、D/A変換器66、RAM54、ROM64、並びにこれ  
15   らの間のデータ授受を行なうバスライン52を備えている。この制御ユニット26では、前記各脚体2の6軸力センサ34、傾斜センサ36、ジョイスティック44等の出力信号はA/D変換器50でデジタル値に変換された後、バスライン52を介してRAM54に入力される。また、ロボット1の各関節のエンコーダ33（ロータリエンコーダ）の出力は  
20   カウンタ56を介してRAM54に入力される。

前記第1の演算装置60は後述の如く、目標歩容を生成すると共に、関節角変位指令（各関節の変位角もしくは各電動モータ32の回転角の指令値）を算出し、RAM54に送出する。また第2の演算装置62はRAM54から関節角変位指令と、前記エンコーダ33の出力信号に基づいて検出された関節角の実測値とを読み出し、各関節の駆動に必要な  
25   操作量を算出してD/A変換器66とサーボアンプ32aとを介して各

関節を駆動する電動モータ 32 に出力する。

図 4 は、本実施形態におけるロボット 1 の歩容生成装置及び制御装置の機能的構成を全体的に示すブロック図である。この図 4 中の「実ロボット」の部分以外の部分が制御ユニット 26 が実行する処理機能（主として第 1 の演算装置 60 及び第 2 の演算装置 62 の機能）によって構成されるものである。尚、以下の説明では、脚体 2 の左右を特に区別する必要がないときは、前記符号 R, L を省略する。

以下説明すると、制御ユニット 26 は、後述の如く目標歩容を自在かつリアルタイムに生成して出力するフルモデル補正入り歩容生成装置 100（以下、歩容生成装置 100 と略称する）を備えている。該歩容生成装置 100 は、その機能によって本願発明の各手段を構成するものである。この歩容生成装置 100 が出力する目標歩容は、補正目標上体姿勢軌道（上体 24 の目標姿勢の軌道）、補正目標上体位置軌道（上体 24 の目標位置の軌道）、目標足平位置姿勢軌道（各足平 22 の目標位置及び目標姿勢の軌道）、目標腕姿勢軌道（各腕体の目標姿勢の軌道）、目標 ZMP（目標全床反力中心点）軌道、目標 ZMP まわりの補正目標床反力モーメント軌道および目標全床反力軌道から構成される。尚、脚体 2 や腕体以外に、上体 24 に対して可動な部位を備える場合には、その可動部位の目標位置姿勢軌道が目標歩容に加えられる。

ここで、上記歩容における「軌道」は時間的変化のパターン（時系列パターン）を意味し、以下の説明では、「軌道」の代わりに「パターン」と称することもある。また、「姿勢」は空間的な向きを意味する。具体的には、例えば上体姿勢は Z 軸（鉛直軸）に対するロール方向（X 軸まわり）の上体 24 の傾斜角（姿勢角）とピッチ方向（Y 軸まわり）の上体 24 の傾斜角（姿勢角）とで表され、足平姿勢は各足平 22 に固定的に設定された 2 軸の空間的な方位角で表される。本明細書では、上

体姿勢は上体姿勢角ということもある。

補正目標上体姿勢および補正目標上体位置は、詳細は後述するが、それぞれ単純化モデルによって生成された仮目標上体姿勢および仮目標上体位置をフルモデル補正によって補正したものである。

- 5 尚、以下の説明では、誤解を生じるおそれがない場合には、しばしば「目標」を省略する。また、歩容のうちの、床反力に係わる構成要素以外の構成要素、すなわち足平位置姿勢、上体位置姿勢等、ロボット1の運動に係わる歩容を総称的に「運動」という。また、各足平22に作用する床反力（並進力及びモーメントからなる床反力）を「各足平床反力」と呼び、ロボット1の全て（2つ）の足平22R, 22Lについての「各足平床反力」の合力を「全床反力」という。ただし、以下の説明においては、各足平床反力はほとんど言及しないので、特に断らない限り、「床反力」は「全床反力」と同義として扱う。
- 10

- 目標床反力は、一般的には、作用点とその点に作用する並進力及びモーメントによって表現される。作用点はどこにとっても良いので、同一の目標床反力でも無数の表現が考えられるが、特に目標床反力中心点（全床反力の中心点の目標位置）を作用点にして目標床反力を表現すると、目標床反力のモーメント成分は、鉛直成分（鉛直軸（Z軸）まわりのモーメント）を除いて零になる。換言すれば、目標床反力中心点まわりの目標床反力のモーメントの水平成分（水平軸（X軸及びY軸）回りのモーメント）は零になる。
- 15
- 20

- 尚、動力学的平衡条件を満足する歩容では、ロボット1の目標運動軌道から算出されるZMP（目標運動軌道から算出される慣性力と重力との合力がその点まわりに作用するモーメントが、鉛直成分を除いて零になる点）と目標床反力中心点は一致することから、目標床反力中心点軌道の代わりに目標ZMP軌道を与えても同じことである（詳細
- 25

は、本願出願人による特願 2 0 0 0 - 3 5 2 0 1 1 号等を参照)。

このような背景から、上記特願 2 0 0 0 - 3 5 2 0 1 1 号の明細書では目標歩容を、次のように定義していた。

5 a) 広義の目標歩容とは、1 歩ないしは複数歩の期間の目標運動軌道とその目標床反力軌道との組である。

b) 狭義の目標歩容とは、1 歩の期間の目標運動軌道とその Z M P 軌道との組である。

c) 一連の歩容は、いくつかの歩容がつながったものとする。

歩行においては、本出願人が先に特開平 1 0 - 8 6 0 8 0 号公報で提案した上体高さ決定手法によってロボット 1 の上体 2 4 の鉛直位置（上  
10 体高さ）が決定されると、並進床反力鉛直成分は従属的に決定される。  
さらに、目標歩容の運動による慣性力と重力との合力が目標 Z M P まわ  
りに発生するモーメントの水平成分が零になるようにロボット 1 の上体  
水平位置軌道を決定することで、並進床反力水平成分も決定される。こ  
15 のため、特願 2 0 0 0 - 3 5 2 0 1 1 号の明細書では、目標歩容の床反  
力に関して明示的に設定すべき物理量としては、目標 Z M P だけで十分  
であった。したがって、狭義の目標歩容の定義としては、上記の b) で  
十分であった。それに対し、本実施形態で主に説明するロボット 1 の走  
行歩容（詳細は後述する）においては、床反力鉛直成分（並進床反力鉛  
20 直成分）も制御上重要である。このため本実施形態では、この床反力鉛  
直成分の目標軌道を明示的に設定した上で、ロボット 1 の目標上体鉛直  
位置等の軌道を決定する。

さらに、本発明では、目標 Z M P まわりに補正目標床反力モーメント  
を発生させる。そこで、本明細書では、狭義の目標歩容を次のように定  
25 義する。

b'') 狭義の目標歩容とは、1 歩の期間の目標運動軌道、目標 Z M P 軌

道、目標ZMPまわりの補正目標床反力モーメントおよび床反力鉛直成分軌道の組である。

本明細書では、特にことわらない限り、目標歩容は上記b'')の狭義の目標歩容の意味で使用する。但し、詳細は後述するが、本明細書の実施形態においては、最終的な目標歩容を生成するまでの過程で作成する  
5 仮目標歩容では、目標ZMPまわりの補正目標床反力モーメントは、本来の目標ZMPの定義に基づいて零とする場合がある。従って、最終的に決定する目標歩容以外の仮目標歩容（例えば後述の単純化モデル歩容）では、上記b'')で定義した狭義の目標歩容から、補正目標床反力  
10 モーメントを除いたもの、すなわち、次のb')で定義されるものを目標歩容の意味で使用する場合がある。

b') 狭義の目標歩容とは、1歩の期間の目標運動軌道、目標ZMP軌道、および床反力鉛直成分軌道の組である。

なお、本明細書では、目標歩容の「1歩」は、ロボット1の片方の脚  
15 体2が着地してからもう一方の脚体2が着地するまでの意味で使用する。また、以下の説明では、「床反力鉛直成分」は「並進床反力鉛直成分」を意味するものとし、床反力のうちのモーメントの鉛直成分（鉛直軸回り成分）は、「モーメント」という用語を用いて「床反力鉛直成分」と区別をする。同様に、「床反力水平成分」は「並進床反力水平成分」を  
20 意味するものとする。

また、歩容における両脚支持期とは言うまでもなく、ロボット1がその自重を両脚体2、2で支持する期間、片脚支持期とはいずれか一方のみの脚体2でロボット1の自重を支持する期間、空中期とは両脚体2、2が床から離れている（空中に浮いている）期間を言う。片脚支持期においてロボット1の自重を支持しない側の脚体2を「遊脚」と呼ぶ。尚、  
25 本実施形態で主に説明する走行歩容では、両脚支持期は無く、片脚支持

期と空中期とが交互に繰り返される。この場合、空中期では両脚 2, 2 とも、ロボット 1 の自重を支持しないこととなるが、該空中期の直前の片脚支持期において遊脚であった脚体 2、支持脚であった脚体 2 をそれぞれ該空中期においても遊脚、支持脚と呼ぶ。

5       ここで、本実施形態で主に説明する図 5 の走行歩容を例にとって、歩容生成装置 100 が生成する目標歩容（特に脚体 2, 2 の運動）の基本的な概要を説明する。なお、歩容に関するその他の定義および詳細は、先に本願出願人が提案した特開平 10-86081 号公報にも記載されているので、以下では、特開平 10-86081 号公報に記載されてい  
10       ない内容を主に説明する。

まず、図 5 に示す走行歩容を説明する。この走行歩容は、人間の通常の走行歩容と同様の歩容である。この走行歩容では、ロボット 1 の左右いずれか一方のみの脚体 2（支持脚）の足平 22 が着地（接地）する片脚支持期と、両脚体 2, 2 が空中に浮く空中期とが交互に繰り返され  
15       る。図 5 の 1 番目の状態は片脚支持期の開始時（初期）の状態、2 番目の状態は片脚支持期の中間時点の状態、3 番目の状態は片脚支持期に続く空中期の開始時（片脚支持期の終了時）の状態、4 番目の状態は空中期の中間時点の状態、5 番目の状態は空中期の終了時（次の片脚支持期の開始時）の状態を示している。

20       この走行歩容では、ロボット 1 は、図 5 の 1 番目の状態で示すように、片脚支持期の開始時において支持脚（ロボット 1 の進行方向前側の脚体 2）側の足平 22 のかかとで着地する。続いて、図 5 の 2 番目の状態で示すように、ロボット 1 は、着地した足平 22（支持脚側の足平 22）の底面のほぼ全面を着地させた後、図 5 の 3 番目の状態で示すように、  
25       その支持脚側の足平 22（図 5 の 3 番目の状態におけるロボット 1 の進行方向後側の脚体 2 の足平 22）のつま先で床を蹴って空中に飛び上が



る。これより片脚支持期が終了すると共に空中期が開始する。尚、片脚支持期における遊脚は、図5の1番目の状態で示すように、片脚支持期の開始時では、支持脚の後側に存在するが、図5の2番目及び3番目の状態で示すように次の着地予定位置に向かって支持脚の前側に振り出される。次いで、図5の4番目の状態で示す空中期を経た後、ロボット1は、遊脚（空中期の開始直前の片脚支持期で遊脚となっていた脚体2）の足平22のかかとで着地し、次の片脚支持期が開始される。

図5の走行歩容を考慮しつつ、前記歩容生成装置100が生成する目標歩容の基本的な概要を説明する。詳細は後述するが、歩容生成装置100が目標歩容を生成するとき、遊脚側の足平22の着地位置姿勢（着地予定位置姿勢）や着地時刻（着地予定時刻）等の目標歩容生成用の基本的な要求値（要求パラメータ）が、前記ジョイスティック44の所要の操作等に応じて歩容生成装置100に与えられる。そして、歩容生成装置100は、その要求パラメータを用いて目標歩容を生成する。より詳しく言えば、歩容生成装置100は、上記要求パラメータに応じて、目標歩容の目標足平位置姿勢軌道、目標床反力鉛直成分軌道等、目標歩容の一部の構成要素を規定するパラメータ（歩容パラメータという）を決定した上で、その歩容パラメータを用いて目標歩容の瞬時値を逐次決定し、該目標歩容の時系列パターン（軌道）を生成する。

この場合、目標足平位置姿勢軌道（より詳しくは、足平の位置及び姿勢の空間的な各成分（X軸成分等）の目標軌道）は、例えば本出願人が特許第3233450号にて提案した有限時間整定フィルタを用いて各足平22毎に生成される。この有限時間整定フィルタは、可変時定数の1次遅れフィルタ、すなわち、伝達関数が $1/(1+\tau s)$ の形で表されるフィルタ（ $\tau$ は可変の時定数。以下、このフィルタを単位フィルタという）を複数段（本実施形態では3段以上）、直列に接続したもので

あり、所望の指定時刻に指定値に到達するような軌道を生成・出力することができるものである。この場合、各段の単位フィルタの時定数 $\tau$ は、いずれも、有限時間整定フィルタの出力生成を開始してから、上記指定時刻までの残時間に応じて逐次可變的に設定される。より詳しくは、該

5 残時間が短くなるに伴い $\tau$ の値が所定の初期値（ $>0$ ）から減少されていき、最終的には、該残時間が0になる指定時刻にて、 $\tau$ の値が0になるように設定される。そして、有限時間整定フィルタには、前記指定値（より詳しくは、有限時間整定フィルタの出力の初期値から前記指定値への変化量）に応じた高さのステップ入力を与えられる。このような有

10 限時間整定フィルタは、指定時刻にて指定値に達するような出力が生成されるだけでなく、指定時刻における有限時間整定フィルタの出力の変化速度を0もしくはほぼ0にすることができる。特に、単位フィルタを3段以上（3段でよい）、接続した場合には、有限時間整定フィルタの出力の変化加速度（変化速度の微分値）をも0もしくはほぼ0にすることが

15 できる。

このような有限時間整定フィルタを用いる足平位置姿勢軌道（足平22が着地してから次に着地するまでの位置姿勢軌道）の生成は、例えば次のように行なわれる。例えばX軸方向（前後方向）の目標足平位置軌道は次のように生成される。すなわち、前記要求パラメータにより定ま

20 る各足平22の次の着地予定位置のX軸方向位置（より詳しくは、次の着地予定位置のひとつ前の着地位置に対するX軸方向の変化量（移動量）。これは前記指定値に相当する）に応じて有限時間整定フィルタへのステップ入力の高さが決定されると共に前記時定数 $\tau$ が所定の初期値に初期化された後、その決定されたステップ入力有限時間整定フィルタ

25 タに与えられ、足平22のX軸方向位置の軌道生成が開始される。そして、この軌道生成時には、前記時定数 $\tau$ は、足平22の着地予定時刻

(これは前記指定時刻に相当する) までに初期値から 0 まで減少していくように、逐次可変設定される。これにより、着地予定時刻で着地予定位置に達するような、足平 22 の X 軸方向の位置の軌道が生成される。

また、Z 軸方向 (鉛直方向) の目標足平位置軌道は、例えば次のよう  
5 に生成される。すなわち、まず、足平 22 の次の着地予定位置及び着地  
予定時刻に応じて、該足平 22 の高さ (鉛直位置) が最大になるときの  
該足平 22 の Z 軸方向位置 (以下、最高点位置という) とその最高点位  
置への到達時刻とが決定される。そして、その最高点位置 (これは前記  
指定値に相当する) に応じて有限時間整定フィルタへのステップ入力の  
10 高さが決定されると共に時定数  $\tau$  が初期化された後、その決定されたス  
テップ入力有限時間整定フィルタに与えられ、前記最高点位置までの  
Z 軸方向の足平位置軌道が逐次生成される。この際、時定数  $\tau$  は、最高  
点位置への到達時刻 (前記指定時刻に相当) までに初期値から 0 まで減  
少するように逐次可変設定される。さらに、最高点位置までの Z 軸方向  
15 位置の軌道の生成が終了したら、時定数  $\tau$  を初期化すると共にいままで  
のステップ入力と逆極性のステップ入力 (より詳しくは、最高点位置か  
ら次の着地予定位置までの Z 軸方向の変化量 (これは前記指定値に相当  
する) に応じた高さの逆極性のステップ入力) が有限時間整定フィルタ  
に入力され、該最高点位置から着地予定位置までの Z 軸方向の足平位置  
20 の軌道が逐次生成される。この際、時定数  $\tau$  は足平 22 の着地予定時刻  
までに初期値から 0 まで減少するように逐次可変設定される。

尚、Z 軸方向の足平位置軌道の生成においては、時定数  $\tau$  を軌道生成  
開始時刻から足平 22 の着地予定時刻まで、初期値から 0 まで継続的に  
減少するように可変設定すると共に、最高点位置への到達時刻もしくは  
25 その近傍時刻で、ステップ入力の極性を逆極性に切り替えることで、Z  
軸方向の足平位置軌道を生成するようにしてもよい。この場合には、足

平 2 2 を所望の最高点位置に精度よく到達させることはできないが、着地予定時刻での着地予定位置への到達は問題なく行なうことができる。

足平姿勢軌道についても、上述した足平位置軌道と同様に有限時間整定フィルタを用いて生成することができる。この場合、足平姿勢の空間  
5 的な各成分のうち、その姿勢の角度変化が単調的（単調増加もしくは単調減少）なものとなる成分については、前記した X 軸方向の足平位置軌道の生成と同様に足平姿勢軌道を生成すればよい。また、姿勢の角度変化が極大値もしくは極小値をもつような成分については、前記した Z 軸  
10 方向の足平位置軌道の生成と同様に足平姿勢軌道を生成すればよい。

10 尚、上記のように有限時間整定フィルタにより生成される目標足平位置姿勢軌道は、床面に固定された後述の支持脚座標系での各足平 2 2 の目標位置姿勢軌道である。

上述のように生成される目標足平位置姿勢軌道は、各足平 2 2 の位置が、その初期接地状態（目標歩容の初期時刻の状態）から着地予定位置  
15 に向かって徐々に加速しながら移動を開始するように生成される。そして、該目標足平位置姿勢軌道は、最終的に着地予定時刻までに徐々に位置の変化速度を 0 またはほぼ 0 にまで減速し、着地予定時刻にて着地予定位置に到達して停止するように生成される。このため、各足平 2 2 の  
20 着地瞬間における対地速度（床に固定された支持脚座標系での各足平 2 2 の位置の変化速度）が 0 またはほぼ 0 になる。したがって、走行歩容において同時に全脚体 2, 2 が空中に存在する状態（空中期での状態）から着地しても、着地衝撃が小さくなる。

前記走行歩容においては、ロボット 1 に作用する重力によって空中期後半から上体 2 4 の鉛直速度は下向きになり、着地時でも下向きのまま  
25 である。したがって、上記のように各足平 2 2 の着地瞬間における対地速度が 0 またはほぼ 0 になるように目標足平位置姿勢軌道を生成すると

共に、後述する如く動力的平衡条件を満たすように上体 24 の目標位置姿勢軌道を生成したとき、着地直前において、上体 24 に対する遊脚側の足平 22 の相対速度は、上向きになる。すなわち、走行歩容の着地瞬間では、ロボット 1 の目標歩容は遊脚側の脚体 2 を上体 24 側に引っ込めながら着地するような歩容となる。言い換えれば、本実施例での目標歩容では、ロボット 1 は、着地瞬間において、遊脚側の足平 22 の対地速度が 0 またはほぼ 0 になるように、上体 24 から見て該足平 22 を引き上げるようにして着地する。これによって、着地衝撃は小さくなり、着地衝撃が過大になるのを防止するようにしている。

- 10      また、本実施形態では、有限時間整定フィルタは、単位フィルタを 3 段以上（例えば 3 段）、直列に接続したものであるため、着地予定時刻までに各足平 22 の速度（足平位置の変化速度）が 0 またはほぼ 0 になるだけでなく、各足平 22 は、その加速度も着地予定時刻にて 0 またはほぼ 0 になって停止する。つまり、着地瞬間における対地加速度も 0 またはほぼ 0 になる。したがって、着地衝撃がより一層小さくなる。特に、実際のロボット 1 の着地時刻が目標の着地時刻からずれても、衝撃があまり増大しなくなる。補足すると、着地予定時刻にて各足平 22 の対地速度を 0 またはほぼ 0 にする上では、有限時間整定フィルタの単位フィルタの段数は 2 段でもよいが、この場合には、着地予定時刻での各足平 22 の加速度は一般には 0 にならない。

- 25      尚、足平姿勢に関しては、各足平 22 が着地予定時刻にてその踵で着地した後、該足平 22 の底面のほぼ全面が床に接地するまで動き続ける。このため、該足平 22 の底面のほぼ全面が床に接地する時刻を前記指定時刻に設定して、前記有限時間整定フィルタにより足平姿勢軌道が生成される。

また、本実施形態では、有限時間整定フィルタを用いて足平位置軌道

を生成したが、着地予定時刻での足平位置の変化速度が0またはほぼ0になる（足平位置の時間微分値が0になる）ように、さらには、該着地予定時刻での足平位置の変化加速度（変化速度の時間微分値）が0またはほぼ0になるように設定された多項式などの関数を用いて目標足平位置軌道を生成するようにしても良い。このことは、目標足平姿勢軌道の生成に関しても同様である。但し、該目標足平姿勢軌道の生成に関しては、上述の如く、各足平22の底面のほぼ全面が床に設置する時刻にて、各足平22の姿勢の変化速度、さらにはその変化加速度が0またはほぼ0になるように多項式などの関数が設定される。

- 10 目標床反力鉛直成分軌道は、例えば図6のように設定される。本実施形態では、走行歩容における目標床反力鉛直成分軌道の形状（詳しくは片脚支持期での形状）は、台形状（床反力鉛直成分の増加側に凸の形状）に定められており、その台形の高さ、折れ点の時刻を目標床反力鉛直成分軌道を規定する歩容パラメータとして、それらの歩容パラメータ
- 15 （床反力鉛直成分軌道パラメータ）が決定される。尚、走行歩容の空中期では、目標床反力鉛直成分は定常的に0に設定される。この例のように、目標床反力鉛直成分軌道は、実質的に連続になるように（値が不連続にならないように）設定するのが良い。これは床反力を制御する際のロボット1の関節の動作を滑らかにするためである。尚、「実質的に連続」というのは、アナログ的に連続な軌道（真の意味での連続な軌道）を離散時間系でデジタル表現したときに必然的に生じる値の飛びは、該軌道の連続性を失わせるものではないということを意味するものである。

- 25 目標ZMP軌道は基本的には次のように設定される。図5の走行歩容においては、前記したように支持脚側足平22のかかとで着地し、次にその支持脚側足平22のつま先で蹴って空中に飛び上がり、最後に遊脚側足平22のかかとで着地する。したがって、片脚支持期での目標ZM

P 軌道は、図 7 の上段図に示すように、支持脚側足平 2 2 のかかとを初期位置として、次に支持脚側足平 2 2 の底面のほぼ全面が接地する期間において該足平 2 2 の前後方向の中央に移動し、その後、離床時まで支持脚側足平 2 2 のつまさきに移動するように設定される。ここで、図 7 の上段図は、X 軸方向（前後方向）の目標 Z M P 軌道を示すものであり、図 7 の下段図は Y 軸方向（左右方向）の目標 Z M P 軌道を示すものである。尚、片脚支持期における Y 軸方向の目標 Z M P 軌道は、図 7 の下段図に示すように、Y 軸方向での支持脚側脚体 2 の足首関節の中心位置と同じ位置に設定される。

図 7 の上段図に示すように、空中期における目標 Z M P 軌道の X 軸方向位置は、次の遊脚側脚体 2 の着地までに支持脚側足平 2 2 のつまさきから遊脚側足平 2 2 のかかとの着地位置まで連続的に移動するようにした。また、図 7 の下段図に示すように、空中期における目標 Z M P 軌道の Y 軸方向位置は、次の遊脚側脚体 2 の着地までに支持脚側脚体 2 の足首関節の中心の Y 軸方向位置から遊脚側脚体 2 の足首関節の中心の Y 軸方向位置まで連続的に移動するようにした。すなわち、歩容の全期間において目標 Z M P 軌道を連続（実質的に連続）にした。ここで、上記した Z M P 軌道の「実質的に連続」の意味は、前記床反力鉛直成分軌道の場合と同様である。

なお、目標歩容の生成に用いる動力学モデルの近似精度等を考慮すると、目標歩容の目標運動をできるだけ連続的なものとする上で、目標 Z M P 軌道は上記のように空中期でも実質的に連続であることが望ましい。但し、本実施形態で用いる後述の動力学モデルでは、必ずしも目標 Z M P が連続的である必要はない。また、本実施形態では、図 7 に示したような目標 Z M P 軌道の折れ点の位置や時刻が、Z M P 軌道パラメータ（目標 Z M P 軌道を規定するパラメータ）として設定される。

また、目標腕姿勢は、上体 24 に対する相対姿勢で表わされる。

また、目標上体位置姿勢、目標足平位置姿勢および後述の基準上体姿勢はグローバル座標系で記述される。グローバル座標系は床に固定された座標系である。グローバル座標系としては、より具体的には、後述する支持脚座標系が用いられる。

本実施形態では、歩容生成装置 100 は、目標上体姿勢だけでなく、基準上体姿勢も生成する。この基準上体姿勢は、歩容に対する要求（歩容生成装置 100 に対する行動計画部などの装置または外部（前記ジョイスティック 44 等）からの要求）にそのまま従って生成される上体姿勢である。

目標上体姿勢（以降、「基準」が付いていない場合には、目標上体姿勢を表す）は、長期的には基準上体姿勢に追従するかまたは一致するように生成される。

図 8 は、歩容生成装置 100 の詳細を示すブロック図である。この図 8 を参照して、歩容生成装置 100 の処理の概要を以下に説明する。

図示の如く、歩容生成装置 100 は歩容パラメータ決定部 100 a を備える。歩容パラメータ決定部 100 a は、目標歩容のパラメータ（目標歩容を規定するパラメータ）の値あるいは時系列テーブルを決定する。これは、後述の図 13 のフローチャートの S018 から S030 までの処理に相当する。

詳細は後述するが、歩容パラメータ決定部 100 a が決定するパラメータには、目標足平位置姿勢軌道、目標腕姿勢軌道、基準上体姿勢軌道、目標 ZMP 軌道、目標床反力鉛直成分軌道等を規定するパラメータが含まれる他、床反力水平成分許容範囲と規定するパラメータと、ZMP 許容範囲を規定するパラメータとが含まれる。この場合、本実施形態で設定する床反力水平成分許容範囲は、後述の S026 の処理で設定される



単純化モデル歩容用のものと、S 0 3 0 で設定される歩容補正用のものとの2種類がある。一方、ZMP許容範囲は、S 0 3 0 処理で設定される歩容補正用のものだけである。

ここで、ZMP許容範囲について簡単に説明しておく。

- 5 後述するように、目標歩容は、目標ZMPのまわりに補正目標床反力モーメントを発生するように修正される。したがって、目標ZMPは、本来の定義（床反力モーメント水平成分が0である点という定義）とは異なる点となり、本来の定義を満足するZMPは、補正目標床反力モーメントを目標床反力鉛直方向成分で割った値だけ目標ZMPの位置から  
10 ずれた位置に移る。以降、本来の定義を満足するZMPを「真のZMP」と呼ぶ。

- 修正された歩容の真のZMPは、少なくともZMP存在可能範囲（いわゆる支持多角形のこと。床と足平22の底面との間に粘着力が作用しないと仮定した場合における床反力作用点（ZMP）の存在可能範囲）  
15 内になければならない。さらにロボット1の安定余裕を十分にとるためには、修正された歩容の真のZMPは、ZMP存在可能範囲のなかの中心付近の範囲にあることが望ましい。そこで、本実施形態では修正された歩容の真のZMPが存在できる許容範囲を設定する。この範囲をZMP許容範囲と呼ぶ。
- 20 ZMP許容範囲は、ZMP存在可能範囲と一致あるいはZMP存在可能範囲内に包含されるように設定される。その設定方法の詳細は後述する。

- 歩容パラメータ決定部100aで決定された歩容パラメータは目標瞬時値発生部100bに入力される。目標瞬時値発生部100bは入力された歩容パラメータに基づき、目標足平位置姿勢、目標ZMP、目標床  
25 反力鉛直成分、目標腕姿勢、目標全体重心鉛直位置、目標上体鉛直位置、

床反力水平成分許容範囲、ZMP許容範囲および基準上体姿勢角の、現在時刻  $t$  における瞬時値を逐次算出（発生）する（図8では一部の目標瞬時値のみを記載している）。この目標瞬時値発生部100bの処理は、後述の図13のフローチャートS032の処理のなかで実行される図3

5 7のS900～S910の処理、並びに、図13のS034、S036の処理に相当する。なお、本実施形態では、目標瞬時値発生部100bが算出する目標瞬時値のうち、一部の瞬時値（具体的には目標上体鉛直位置の瞬時値）は仮値であり、後に修正される。また、目標瞬時値発生部100bが算出する床反力水平成分許容範囲の瞬時値は、単純化モデル

10 ル歩容用の瞬時値と歩容補正用の瞬時値とがある。

目標瞬時値発生部100bで算出（発生）された目標瞬時値（一部は仮瞬時値）は、フルモデル補正部100cに入力される。フルモデル補正部100cは、動力学モデルとして、単純化モデル100c1とフルモデル100c2とを備える。該フルモデル補正部100cは、単純化

15 モデル100c1に基づいて、入力値から目標上体位置姿勢の仮瞬時値等を決定すると共に、さらに決定された上体位置姿勢の仮瞬時値等をフルモデル100c2を用いて修正する。

尚、単純化モデル100c1をフルモデル補正部100cに含ませない構成も可能である。また、フルモデル100c2は、後述するように、

20 逆フルモデル（逆動力学フルモデル）と順フルモデル（順動力学フルモデル）とのいずれかを含む。

フルモデル補正部100cは、より具体的には、次のA1～A3の条件を満足するように、B1あるいはB2の処理を実行する。すなわち、フルモデル補正部100cは、

25 A1）単に単純化モデルに基づいて生成した歩容（以降、これを単純化モデル歩容と呼ぶ）よりも高い精度で動力学的平衡条件を満足する。

A2) 真のZMP (目標ZMPのまわりに補正目標床反力モーメントを発生させることによって修正された本来の定義を満足するZMP) は、ZMP許容範囲 (安定余裕が十分維持できる許容範囲) に存在する。

A3) 床反力水平成分は歩容補正用の床反力水平成分許容範囲内になる。

5 という条件を満足するように、

B1) 単純化モデルを用いて決定された単純化モデル歩容の上体位置姿勢を補正する。

あるいは

10 B2) 単純化モデルを用いて決定された単純化モデル歩容の上体位置姿勢を補正すると共に、目標ZMPまわりの補正目標床反力モーメントを出力する (目標床反力を補正する)。

尚、目標ZMPまわりの補正目標床反力モーメントは、前記した式b01に従って、ZMP換算値に変換しても良い。また、ZMP許容範囲は、前記式b01に従って、補正目標床反力モーメント許容範囲に変換  
15 しても良い。

ロボット1の脚体2, 2の関節は図1に示したように12関節から構成されているので、得られた両足平22R, 22Lの位置姿勢と上体位置姿勢とから、後述するように逆キネマティクス演算によって目標関節変位が一義的に決定される。即ち、今回の (現在時刻tの) ロボット1  
20 の目標姿勢が一義的に決定される。

補正目標歩容の瞬時値 (瞬時姿勢) は、図4に示す複合コンプライアンス制御装置 (図4で破線で囲んだ部分) に入力され、実ロボット1のバランスを保ちつつ、目標歩容に追従するように関節アクチュエータ (電動モータ32) が制御される。

25 以上が、本実施形態の装置構成およびその動作の概要である。

次に、本実施形態で歩容生成に用いられる上体運動モードと前記単純

化モデルとについて説明する。

走行など、空中期がある歩容や、低摩擦床面での歩行においては、特願2000-352011号等にて本願出願人が先に提案した技術のように単に上体水平加速度を調整するだけでは、目標歩容の床反力水平成分が許容範囲内（あるいは摩擦限界内）に存在しつつ動力学的平衡条件を満足することができない場合がある。そこで、本実施形態では、以下に説明する上体24の2つの運動モード（上体並進モード及び上体回転モード）を複合的に発生させることにより、目標歩容の床反力水平成分が許容範囲内（あるいは摩擦限界内）に存在しつつ動力学的平衡条件を満足するようにしている。

図9のように、ある運動状態から、上体水平加速度だけを摂動させると、全体重心水平加速度と全体重心まわりの角運動量が摂動する。すなわち、上体水平加速度の摂動は、（それによって発生する慣性力と重力の合力に対して動力学的に釣り合う）床反力鉛直成分を摂動させずに、目標ZMPまわりの床反力モーメント（ただし鉛直軸まわり成分を除く）と床反力水平成分（厳密には、並進床反力水平成分）とを摂動させる。この運動モードを上体並進モードと呼ぶ。

言いかえると、床反力鉛直成分を変化させずに、目標ZMPまわりの床反力モーメントの水平成分と床反力水平成分（並進床反力水平成分）を変化させる運動を上体並進モードと呼ぶ。

この時の単位加速度当たりの床反力モーメント成分の変化を $\Delta M_p$ 、単位加速度当たりの床反力水平成分の変化を $\Delta F_p$ とする。図9に示す状況で上体24を前方に水平加速すると、 $\Delta M_p$ と $\Delta F_p$ は図9に示す矢印の向きに作用する。

感覚的に判り易くするために、運動によって発生する慣性力と重力の合力に釣り合う床反力を用いて表現したが、慣性力と重力の合力を用い

て表現した方が、理論的には的確である。なお、上記合力と床反力は、互いに大きさが同じで向きが逆になっている。

$\Delta M_p$  と  $\Delta F_p$  の比を上体並進モード床反力比率  $h$  と呼ぶ。すなわち、次式により、上体並進モード床反力比率  $h$  を定義する。

5

$$h = \Delta M_p / \Delta F_p \quad \dots \text{式 a7}$$

一方、図10のように、ある運動状態から、ある点  $P_r$  まわりに上体姿勢角加速度を摂動させると、全体重心は摂動せずに、全体重心まわりの角運動量が摂動する。すなわち、点  $P_r$  まわりの上体姿勢角加速度摂動は、床反力鉛直成分と床反力水平成分（厳密には、並進床反力鉛直成分と並進床反力水平成分）を摂動させずに、目標  $ZMP$  まわりの床反力モーメントの水平成分を摂動させる。この運動モードを上体回転モードと呼ぶ。

15 言いかえると、床反力鉛直成分と床反力水平成分を変化させずに、目標  $ZMP$  まわりの床反力モーメントの水平成分を変化させる運動を上体回転モードと呼ぶ。

この時の単位角加速度当たりの床反力モーメント成分の変化を  $\Delta M_r$ 、単位角加速度当たりの床反力の水平成分の変化を  $\Delta F_r$  とする。  $\Delta F_r$  は零である。図10に示す状況で上体が前傾するように角加速度を与え  
20 ると、 $\Delta M_r$  は図10に示す矢印の向きに作用する。

上体24の運動には、上体並進モードと上体回転モード以外に、上体鉛直移動モードがある。これは、上体24を鉛直方向に移動させる運動である。

25 目標瞬時値発生部100bでは、以下に示す単純化（動力学）モデルを用いて歩容を生成する。単純化モデルは、動力学の精度よりも、演算

量低減や挙動解析のし易さに重点を置いた動力学モデルであり、動力学的に一部無視があったり（例えば、重心まわりの角運動量変化を無視したり）、矛盾があるもの（厳密さを欠くもの）でも良い。

図11に、単純化した動力学モデル（単純化モデル）の例を示す。図示の如く、この動力学モデルはロボット1の各脚体2にそれぞれ対応する2つの質点 $2m$ 、 $2m$ 、及び上体24に対応する質点 $24m$ からなる合計3質点と、イナーシャがあって質量のないフライホイールFHとから構成されるモデルである。この動力学モデルでは、デカップルド、即ち、脚体2, 2の動力学（各質点 $2m$ 、 $2m$ の動力学）と上体24の動力学（質点 $24m$ 及びフライホイールFHの動力学）とが相互に非干渉に構成されると共に、ロボット1全体の動力学は、それらの線形結合で表される。また、さらに、上体24の運動と床反力との関係も、上体24の並進運動（上体並進モード）と床反力との関係、並びに上体24の回転運動（上体回転モード）と床反力との関係に分離される。具体的には、上体質点 $24m$ の水平運動によって発生する床反力は、上体24の水平方向並進運動（上体並進モード）によって発生する床反力に対応し、フライホイールの回転運動によって発生する床反力は、上体24の姿勢角の回転運動（上体回転モード）によって発生する床反力に対応する。

尚、ロボット1の腕体の質量は上体24に含まれるものとし、上体質点 $24m$ は腕体の質量を含む質量をもつ。本実施形態では、目標歩容における腕体の運動（腕振り運動）は、後述するように、ロボット1の腕振り以外の運動によってロボット1に発生する鉛直軸まわりの慣性力のモーメントを打ち消しつつも、上体24に対する両腕体の全体の重心の相対位置が動かないように行なわれるので、腕体の腕振り運動による（鉛直軸まわり成分を除く）床反力モーメントへの影響と床反力水平成分への影響とは無視する。

以下に上記単純化モデルを数式化する。ただし、説明を簡単にするために、サジタルプレーン（前後軸（X軸）と鉛直軸（Z軸）を含む平面）での運動方程式のみを記述し、ラテラルプレーン（左右軸（Y軸）と鉛直軸（Z軸）を含む平面）での運動方程式を省略した。

- 5 説明の便宜上、動力学モデルに関する変数およびパラメータを以下のように定義する。なお、各質点 2 m, 2 m, 2 4 m はそれに対応する部位の代表点であるか、あるいはその部位の位置姿勢から幾何学的に一義的に決定される点に相当する。例えば、支持脚側脚体 2 の質点 2 m の位置は、該脚体 2 の足平 2 2 の底面の前記代表点から所定の距離だけ上方
- 10 の点とする。

$Z_{sup}$  : 支持脚質点鉛直位置

$Z_{swg}$  : 遊脚質点鉛直位置

$Z_b$  : 上体質点鉛直位置（上体鉛直位置とは一般的には異なる。）

$Z_{Gtotal}$  : 全体重心鉛直位置

- 15  $X_{sup}$  : 支持脚質点水平位置

$X_{swg}$  : 遊脚質点水平位置

$X_b$  : 上体質点水平位置（前記点  $P_r$  から前後にある所定の距離だけオフセットした点である。オフセットは、直立時などにおいて、厳密モデルの重心位置と、本動力学モデルの重心位置ができる限り一致するように、決定される。上体水平位置とは一般的には異なる。）

- 20

$X_{Gtotal}$  : 全体重心水平位置

$\theta_{by}$  : 鉛直方向に対する Y 軸回りの上体姿勢角（傾斜角）

$m_b$  : 上体質点質量

$m_{sup}$  : 支持脚質点質量

- 25  $m_{swg}$  : 遊脚質点質量

$m_{total}$  : ロボット総質量（ $=m_{total}+m_{sup}+m_{swg}$ ）

J : 上体慣性モーメント (上体回転モードにおける等価慣性モーメントである。実ロボット 1 の上体 2 4 部位の慣性モーメントとは一般的には一致しない。)

F<sub>x</sub> : 床反力水平成分 (詳しくは並進床反力の前後方向 (X 軸) 成分)

- 5 F<sub>z</sub> : 床反力鉛直成分 (詳しくは並進床反力の鉛直方向 (Z 軸) 成分。  
本実施形態では、これは目標並進床反力鉛直成分に等しい)

M<sub>y</sub> : 目標 Z M P まわりの床反力モーメント (詳しくは床反力モーメントの左右軸 (Y 軸) まわり成分)

- 尚、本実施形態では、各脚体 2 の質点 2 m の位置と、その脚体 2 の足  
10 平 2 2 の位置 (足平 2 2 のあらかじめ定められた代表点の位置) との位置関係はあらかじめ定められており、一方の位置が決まれば、他方の位置は一義的に定まるものとされている。また、上体質点 2 4 m と、上体 2 4  
15 の位置 (上体 2 4 のあらかじめ定められた代表点の位置) との位置関係は、上体 2 4 の姿勢角に応じてあらかじめ定められており、一方の位置と姿勢角とが決まれば、他方の位置は一義的に定まるものとされている。

また、任意の変数 X に対して、 $dX/dt$  は X の 1 階微分を表わし、 $d^2X/dt^2$  は X の 2 階微分を表わす。したがって、変数 X が変位ならば、 $dX/dt$  は速度、 $d^2X/dt^2$  は加速度を意味する。g は重力加速度定数を示す。ここでは、g は正の値とする。

- 20 上記動力学モデルの運動方程式 (動力学的平衡条件を表す式) は、式 a 8、式 a 9、式 a 10 で表される。

$$F_z = m_b \cdot (g + d^2Z_b/dt^2) + m_{sup} \cdot (g + d^2Z_{sup}/dt^2) + m_{swg} \cdot (g + d^2Z_{swg}/dt^2) \quad \dots\dots \text{式 a 8}$$

$$25 \quad F_x = m_b \cdot d^2X_b/dt^2 + m_{sup} \cdot d^2X_{sup}/dt^2 + m_{swg} \cdot d^2X_{swg}/dt^2 \quad \dots\dots \text{式 a 9}$$



$$\begin{aligned}
M_y = & -m_b \cdot (X_b - X_{zmp}) \cdot (g + d^2 Z_b / dt^2) + m_b \cdot (Z_b - Z_{zmp}) \cdot (d^2 X_b / dt^2) \\
& - m_{sup} \cdot (X_{sup} - X_{zmp}) \cdot (g + d^2 Z_{sup} / dt^2) \\
& + m_{sup} \cdot (Z_{sup} - Z_{zmp}) \cdot (d^2 X_{sup} / dt^2) \\
& - m_{swg} \cdot (X_{swg} - X_{zmp}) \cdot (g + d^2 Z_{swg} / dt^2) \\
& + m_{swg} \cdot (Z_{swg} - Z_{zmp}) \cdot (d^2 X_{swg} / dt^2) + J \cdot d^2 \theta_{by} / dt^2
\end{aligned}$$

…式 a 10

また、ロボット全体重心位置には次の関係式が成立する。

$$Z_{Gtotal} = (m_b \cdot Z_b + m_{sup} \cdot Z_{sup} + m_{swg} \cdot Z_{swg}) / m_{total} \quad \dots \text{式 b 1 1}$$

$$X_{Gtotal} = (m_b \cdot X_b + m_{sup} \cdot X_{sup} + m_{swg} \cdot X_{swg}) / m_{total} \quad \dots \text{式 b 1 2}$$

10

以下に上記動力学モデルと前記  $\Delta F_p$ 、 $\Delta M_p$ 、 $\Delta F_r$ 、 $\Delta M_r$  の関係を示す。

前記  $\Delta F_p$  は、式 a 9 において、 $d^2 X_b / dt^2$  を単位量だけ摂動させたときの  $F_x$  の摂動量であるから、次式によって求められる。

$$\Delta F_p = m_b \quad \dots \text{式 c 0 6}$$

すなわち、上体並進モードの単位加速度当たりの床反力の水平成分の変化  $\Delta F_p$  は、上記動力学モデルの上体質点 24 m の質量に相当する。

前記  $\Delta M_p$  は、式 a 10 において、 $d^2 X_b / dt^2$  を単位量だけ摂動させたときの  $M_y$  の摂動量であるから、次式によって求められる。

$$\Delta M_p = m_b \cdot (Z_b - Z_{zmp}) \quad \dots \text{式 c 0 7}$$

すなわち、上体並進モードの単位加速度当たりの床反力モーメント成分の変化  $\Delta M_p$  は、上記動力学モデルの上体質点質量に、上体質点 24 m の目標 ZMP からの高さ（鉛直位置）を乗じたものになる。このときの上体質点 24 m 及び目標 ZMP の位置と、上体質点 24 m の運動との関係は、上体質点 24 m を倒立振子質点、目標 ZMP を倒立振子支点に対応づけたときの倒立振子の挙動に相当する。

25

前記  $\Delta F_r$  は、式 a 9 において、 $d^2\theta_b/dt^2$  を単位量だけ摂動させたときの  $F_x$  の摂動量であるから、次式によって求められる。

$$\Delta F_r = 0 \quad \dots \text{式 c 0 8}$$

すなわち、上体回転モードの単位加速度当たりの並進床反力水平成分の  
5 変化  $\Delta F_r$  は、0 である。

前記  $\Delta M_r$  は、式 a 10 において、 $d^2\theta_b/dt^2$  を単位量だけ摂動させたときの  $M_y$  の摂動量であるから、次式によって求められる。

$$\Delta M_r = J \quad \dots \text{式 c 0 9}$$

すなわち、上体回転モードの単位加速度当たりの床反力モーメント成分  
10 の変化  $\Delta M_r$  は、フライホイールの慣性モーメントに相当する。

詳細は後述するが、上記例の単純化動力学モデルを用いた歩容（単純化モデル歩容）の生成は、以下の手順で実行される。

まず、歩容パラメータから算出される両足平位置姿勢軌道および目標  
床反力鉛直方向成分などを基に、式 a 8 を用いて上体鉛直加速度が求め  
15 られる。さらに、この求めた上体鉛直加速度を2階積分して、上体鉛直  
移動モードの上体鉛直位置  $Z_b$  が求められる。

最後に、式 a 9、式 a 10 を用いて、床反力水平成分が許容範囲（単純化モデル歩容用の床反力水平成分許容範囲）を越えないように、上体  
水平加速度  $d^2(X_b)/dt^2$  と上体姿勢角加速度  $d^2(\theta_b)/dt^2$  が決定される。  
20 さらに、これらの加速度を2階積分して、上体並進モードの上体水平位置  
 $X_b$  および上体回転モードの上体姿勢角  $\theta_b$ （より詳しくはそれらの  
仮瞬時値）が求められる。

より一般的に言うと、単純化動力学モデルを用いた歩容（単純化モデル歩容）は、歩容パラメータから決定される両足平位置姿勢軌道、目標  
25  $ZMP$  および目標床反力鉛直成分などを基に、重力と慣性力との合力が  
目標  $ZMP$  まわりに作用するモーメントが0になり、かつ重力と慣性力

との合力の並進力鉛直成分と目標床反力鉛直成分の和が0になり、かつ、目標床反力水平成分（すなわち重力と慣性力の合力の並進力水平成分の符号を反転したもの）が床反力水平成分許容範囲を越えないように、上体位置軌道と上体姿勢角軌道を算出することにより、生成される。

- 5 この明細書の実施形態において、「フルモデル」は、今回歩容パラメータを決定する際に用いるものとは異なるロボット動力学モデルを意味する。これは、今回歩容パラメータを決定する際に用いるものよりも近似精度の高いロボット動力学モデルであることが望ましい。図示例で説明すれば、本実施形態では、前記図11に示した単純化モデルを今回歩容パラメータの決定に用いるので、それよりも、近似精度の高い、例えば図12に示す多質点モデル（ロボット1の各リンクにそれぞれ質点を有するモデル）のようなロボット動力学モデルをフルモデルとして用いることが望ましい。この場合、該フルモデルは、質点のまわりに慣性モーメントを設定するものであっても良い。
- 10 しかし、単純化モデルとフルモデルとは、必ずしもモデルの近似精度が異なる必要はない。単純化モデルとフルモデルとは、動力学方程式が同じで、床反力水平成分許容範囲が異なっている、すなわち、単純化モデル歩容用の許容範囲と、歩容補正用の許容範囲とが異なっているだけでも良い。たとえば、単純化モデルを用いた歩容を生成する際の床反力
- 15 水平成分許容範囲を大きくとり（摩擦限界を越えていても良い）、フルモデルを用いて歩容を修正する際の床反力水平成分許容範囲をスリッパしにくいように狭く設定するだけでも良い。

- 25 尚、この明細書において、目標足平位置姿勢、目標床反力（特に、目標ZMPと目標床反力鉛直成分）に基づいて（入力して）上体位置姿勢を算出する（出力させる）のに使用するモデルを「順動力学モデル」と呼び、目標足平位置姿勢、目標上体姿勢、目標上体位置に基づいて（入

力して)床反力(特に、目標ZMPもしくは目標ZMPまわりの床反力モーメントと床反力水平成分)を算出する(出力させる)のに使用するモデルを「逆動力学モデル」と呼ぶ。順動力学モデルの入力には、少なくとも目標床反力が含まれ、逆動力学モデルの入力には、少なくとも目標運動が含まれる。

フルモデル補正部100cが備えるフルモデルは、逆動力学フルモデル(しばしば「逆フルモデル」と略称)または順動力学フルモデル(しばしば「順フルモデル」と略称)を備える。一般的には、逆動力学モデルの演算に比べ、順動力学モデルの演算は、演算量が多くなりがちである。

次に、本発明の第1実施形態に関して、歩容生成装置100の処理の詳細をより具体的に説明する。

本実施形態における歩容生成装置100は、ロボット1の片方の脚体2が着地してから他方の脚体2が着地するまでの1歩分の目標歩容(前記b''により定義した目標歩容)を単位として、その1歩分の目標歩容を順番に生成する。例えば、図5の走行の目標歩容を生成する場合、該目標歩容は片脚支持期の開始時から、これに続く空中期の終了時(次の片脚支持期の開始時)までの目標歩容が順番に生成される。ここで、新たに生成しようとしている目標歩容を「今回歩容」、その次の目標歩容を「次回歩容」、さらにその次の目標歩容を「次次回歩容」、というように呼ぶ。また、「今回歩容」の一つ前に生成した目標歩容を「前回歩容」と呼ぶ。

また、歩容生成装置100が今回歩容を新たに生成するとき、該歩容生成装置100には、ロボット1の2歩先までの遊脚側足平22の着地予定位置姿勢、着地予定時刻の要求値(要求)が歩容に対する要求パラメータとして入力される(あるいは歩容生成装置100が記憶装置から

要求パラメータを読み込む)。そして、歩容生成装置100は、これらの要求パラメータを基に、補正目標上体位置姿勢軌道、目標足平位置姿勢軌道、目標ZMP軌道、目標床反力鉛直成分軌道、目標腕姿勢軌道、補正目標床反力モーメント軌道等を生成する。

- 5      以下に図5の走行歩容を生成することを例にして、歩容生成装置100の歩容生成処理の詳細を図13～図39を参照しつつ説明する。図13は、その歩容生成装置100が実行する歩容生成処理を示すフローチャート（構造化フローチャート）である。

- 10      まずS010において時刻 $t$ を0に初期化するなど種々の初期化作業が行なわれる。この処理は、歩容生成装置100の起動時等に行なわれる。次いで、S012を経てS014に進み、歩容生成装置100は、制御周期（図12のフローチャートの演算処理周期）毎のタイマ割り込みを待つ。制御周期は $\Delta t$ である。

- 15      次いで、S016に進み、歩容の切り替わり目であるか否かが判断され、歩容の切り替わり目であるときはS018に進むと共に、切り替わり目でないときはS030に進む。ここで、上記「歩容の切り替わり目」は、前回歩容の生成が完了し、今回歩容の生成を開始するタイミングを意味し、例えば前回歩容の生成を完了した制御周期の次の制御周期が歩容の切り替わり目になる。

- 20      S018に進むときは時刻 $t$ が0に初期化され、次いでS020に進み、次回歩容支持脚座標系、次次回歩容支持脚座標系、今回歩容周期および次回歩容周期が読み込まれる。これらの支持脚座標系及び歩容周期は、前記要求パラメータにより定まるものである。すなわち、本実施形態では、歩容生成装置100にジョイスティック44等から与えられる要求パラメータは、2歩先までの遊脚側足平22の着地予定位置姿勢（足平22が着地してから足底を床面にほぼ全面的に接触させるように、滑
- 25

らさずに回転させた状態での足平位置姿勢)、着地予定時刻の要求値を含んでおり、その1歩目の要求値、2歩目の要求値がそれぞれ、今回歩容、次回歩容に対応するものとして、今回歩容の生成開始時（前記S016の歩容の切り替わり目）以前に歩容生成装置100に与えられたものである。なお、これらの要求値は今回歩容の生成途中でも変更することは可能である。

そして、上記要求パラメータにおける1歩目の遊脚側足平22（今回歩容での遊脚側足平22）の着地予定位置姿勢の要求値に対応して次回歩容支持脚座標系が定まる。

- 10 例えば図16を参照して、今回歩容（1歩目）に係わる遊脚側足平22（図では22L）の着地予定位置姿勢の要求値が、今回歩容の支持脚側足平22（図では22R）の着地位置姿勢に対して、今回歩容支持脚座標系のX軸方向（今回歩容の支持脚側足平22Rの前後方向）及びY軸方向（今回歩容の支持脚側足平22Rの左右方向）に、それぞれ
- 15  $x_{next}$ 、 $y_{next}$  だけ移動し、且つZ軸回り（鉛直軸回り）に $\theta_{znext}$  だけ回転させた位置姿勢であるとする。ここで、支持脚座標系は、支持脚側足平22を水平姿勢（より一般的には床面に平行な姿勢）にして該支持脚側足平22の底面のほぼ全面を床面に接触（密着）させた状態において、該支持脚側脚体2の足首中心から床面に延ばした垂線が該床面と
- 20 交わる点（この点は、本実施形態の例では支持脚側足平22の底面のほぼ全面を床面に接触させた状態では、該足平22の代表点と合致する）を原点とし、その原点を通る水平面をXY平面とするグローバル座標系（床に固定された座標系）である。この場合、X軸方向、Y軸方向は、それぞれ支持脚側足平22の前後方向、左右方向である。尚、支持脚座
- 25 標系の原点は、必ずしも支持脚側足平22の底面のほぼ全面を床面に接触させた状態での該足平22の代表点（足平22の位置を代表する点）

に合致する必要はなく、該代表点と異なる床面上の点に設定されてもよい。

このとき、次回歩容支持脚座標系は、図示のように今回歩容の遊脚側足平22Lの着地予定位置姿勢の要求値に従って該足平22を着地させた場合（足平22の代表点を着地予定位置の要求値に一致させ、且つ、足平22の姿勢（向き）を着地予定姿勢の要求値に一致させた場合）における該足平22Lの代表点（より詳しくは該代表点に合致する床上の点）を原点とし、該原点を通る水平面内における該足平22Lの前後方向、左右方向をそれぞれX'軸方向、Y'軸方向とする座標系である。

- 10 上記と同様に、2歩目の遊脚側足平22の着地予定位置姿勢の要求値に応じて次々回歩容支持脚座標系（図15のX''Y''座標を参照）が定まる。また、今回歩容周期は、今回歩容の支持脚側足平22の着地予定時刻（要求値）から、1歩目（今回歩容）の遊脚側足平22の着地予定時刻（要求値）までの時間として定まり、次回歩容周期は、1歩目の遊脚側足平22の着地予定時刻（要求値）から2歩目の遊脚側足平22の着地予定時刻（要求値）までの時間として定まる。

- 20 尚、前記要求パラメータは、本実施形態ではジョイスティック44の所要の操作によって歩容生成装置100に入力されるものであるが、あらかじめ該要求パラメータあるいはこれに対応する上記の支持脚座標系の位置姿勢及び歩容周期をロボット1の移動スケジュールとして記憶しておいても良い。あるいは、ジョイスティック44などの操縦装置からの指令（要求）とそのときまでのロボット1の移動履歴とを基に前記次回及び次次回歩容支持脚座標系、並びに今回及び次回歩容周期を決定しても良い。

- 25 次いでS022に進み、歩容生成装置100は、今回歩容に続く仮想的な周期的歩容としての定常旋回歩容の歩容パラメータを決定する。該

歩容パラメータは、定常旋回歩容における目標足平位置姿勢軌道を規定する足平軌道パラメータ、基準とする上体姿勢軌道を規定する基準上体姿勢軌道パラメータ、目標腕姿勢軌道を規定する腕軌道パラメータ、目標ZMP軌道を規定するZMP軌道パラメータ、目標床反力鉛直成分軌道  
5 道を規定する床反力鉛直成分軌道パラメータを含む。さらに、目標床反力水平成分許容範囲を規定するパラメータも歩容パラメータに含まれる。

尚、この明細書で「定常旋回歩容」は、その歩容を繰り返したときに歩容の境界（本実施形態では1歩毎の歩容の境界）においてロボット1の運動状態（足平位置姿勢、上体位置姿勢等の状態）に不連続が生じない  
10 ような周期的歩容を意味するものとして使用する。以降、「定常旋回歩容」を「定常歩容」と略す場合もある。

周期的歩容である定常旋回歩容は、本実施形態では、ロボット1の2歩分の歩容、すなわち今回歩容に続く第1旋回歩容と該第1旋回歩容に続く第2旋回歩容とからなる歩容を該定常旋回歩容の1周期分の歩容として、その1周期分の歩容を繰り返す歩容である。尚、ここで「旋回」  
15 なる用語を用いたのは、旋回率を零とするときは直進を意味するので、直進も広義の意味で旋回に含ませることができるからである。また、生成する目標歩容が前記図5の走行歩容であると、その目標歩容の今回歩容は、片脚支持期及び空中期を有する走行歩容であるので、定常旋回歩容の第1旋回歩容及び第2旋回歩容は、いずれも今回歩容と同様に片脚  
20 支持期と空中期とを有する歩容である。つまり、第1旋回歩容及び第2旋回歩容の基本的な歩容形態は今回歩容と同一である。

定常旋回歩容について補足すると、2足移動ロボットでは、定常旋回歩容の1周期分は、前記した狭義の意味での歩容が、少なくとも2歩分、  
25 必要である。そして、3歩以上の歩容を1周期分の歩容とする複雑な定常旋回歩容を設定することも可能である。但し、定常旋回歩容は、後述



の如く、今回歩容の終端（終了時刻）における発散成分（詳細は後述する）を決定するためだけに用いられる。このため、3歩以上の歩容を1周期とする定常巡回歩容を用いることは、歩容生成の処理が煩雑となるにも関わらず、効果は少ない。そこで、本実施形態での定常巡回歩容の

5 1周期分の歩容を2歩分の歩容（第1及び第2巡回歩容）により構成するようにしている。尚、3足以上の脚式移動ロボットにあっては、それに応じて定常巡回歩容を定義するに足る歩容数が増加する。以下では、説明の便宜上、複数の狭義の歩容（本実施形態では2歩分の歩容）から成る定常巡回歩容を1歩の歩容とみなす。

10 定常巡回歩容は、歩容生成装置100で今回歩容の終端における発散成分や上体鉛直位置速度、上体姿勢角及びその角速度等のロボット1の運動状態を決定するために暫定的に作成されるものであり、歩容生成装置100からそのまま出力されるものではない。

尚、「発散」とは、図14に示すように、2足移動ロボット1の上体

15 24の位置が両足平22，22の位置からかけ離れた位置にずれてしまうことを意味する。発散成分の値とは、2足移動ロボット1の上体24の位置が両足平22，22の位置（より具体的には、支持脚側足平22の接地面に設定されたグローバル座標系（支持脚座標系）の原点）からかけ離れていく具合を表す数値である。

20 本実施形態では、目標歩容が、前記発散を生じることなく、継続的に生成されるように、発散成分を指標にして歩容を生成するようにした。ただし、継続的な歩容の代表例である定常歩容（歩容の軌道の不連続を発生することなく、同じパターンの歩容を繰り返すことができる周期的歩容であり、原理上、無限回繰り返しても発散しない歩容）の初期発散

25 成分（定常歩容の初期時刻での発散成分）であっても、単純に0ではなく、定常歩容のパラメータが変われば、その初期発散成分も変わる。す

なわち、歩き方あるいは走り方等の歩容形態によって、適切な発散成分が変わる。そこで、本実施形態では、これから生成しようとする今回歩容の後に続く定常歩容が前記今回歩容に係わる要求パラメータに応じて設定され、定常歩容の初期発散成分を求めてから、今回歩容の終端発散成分を定常歩容の初期発散成分に一致させる（より一般的には、今回歩容を定常歩容に連続させもしくは近づける）ように、今回歩容を生成する。このような歩容生成の基本的な指針は本出願人が先に提案した特願 2000-352011 号のものと同様である。

本発明の実施形態では、特願 2000-352011 号の第 1 実施形態で用いたような線形な 3 質点動力学モデルを用いていないが、次式で定義される発散成分および収束成分の概念は、図 11 に示した単純化モデルのような非線形な動力学モデルの挙動の摂動分に対しても、近似的に十分な精度で適用することができる。

$$\begin{aligned} \text{発散成分} &= \text{上体質点水平位置} + \text{上体質点水平速度} / \omega_0 \\ &\dots \text{式 c 1 0} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{収束成分} &= \text{上体質点水平位置} - \text{上体質点水平速度} / \omega_0 \\ &\dots \text{式 c 1 1} \end{aligned}$$

ただし、ここでの上体質点水平位置は、図 11 に示す前記単純化モデル（動力学モデル）においては、上体質点水平位置  $X_b$  を表す。

また、 $\omega_0$  はある所定の値であり、走行時では、特願 2000-352011 号の歩行歩容生成時の値に対して若干変更する必要がある。

発散成分および収束成分に関するその他の詳細は、特願 2000-352011 号に記載されているので、ここではこれ以上言及しない。

本実施形態においては、特願 2000-352011 号に示した方式

に加え、さらに、後述するように、目標床反力鉛直成分軌道を規定する歩容パラメータを設定し、この目標床反力鉛直成分を動力的に満足するようにロボット1の全体重心鉛直位置を決定する。この場合、床反力鉛直成分の2階積分値がロボット1の全体重心鉛直位置を規定するものになるので、目標床反力鉛直成分の設定が悪いと、ロボット1の全体重心鉛直位置もしくは上体鉛直位置が高くなり過ぎたり低くなり過ぎたりする。したがって、目標床反力鉛直成分の設定方法も重要な課題である。

本題に戻り、S022では、図15に示すフローチャートに従って、以下の処理が行われる。

10 まず、S100において、今回歩容、第1旋回歩容、第2旋回歩容の順に足平位置姿勢軌道がつながるように、定常歩容の歩容パラメータのうちの足平軌道パラメータが決定される。以下に具体的な設定方法を図16を参照して説明する。尚、以降の説明では、支持脚側の脚体2の足平22を支持脚足平と称し、遊脚側の脚体2の足平2を遊脚足平を称する。また、歩容の「初期」、「終端」はそれぞれ歩容の開始時刻、終了時刻もしくはそれらの時刻における瞬時歩容を意味する。

足平軌道パラメータは、第1旋回歩容および第2旋回歩容の初期及び終端のそれぞれにおける支持脚足平及び遊脚足平のそれぞれの位置姿勢、各旋回歩容の歩容周期等から構成される。この足平軌道パラメータのうち、第1旋回歩容初期遊脚足平位置姿勢は、次回歩容支持脚座標系から見た今回歩容終端支持脚足平位置姿勢とされる。この場合、走行歩容では、今回歩容終端における支持脚足平22は、空中に移動している。そして、今回歩容終端支持脚足平位置姿勢は、今回歩容初期支持脚足平位置姿勢（＝前回歩容終端遊脚足平位置姿勢）から、前記要求パラメータにおける2歩目の遊脚側足平22の着地予定位置姿勢の要求値（今回歩容の支持脚足平22の次回歩容における着地予定位置姿勢の要求値）も

しくは該要求値に対応する次次回歩容支持脚座標系に依じて定まる次回歩容終端遊脚足平位置姿勢に至る足平位置姿勢軌道（詳しくは次回歩容支持脚座標系から見た軌道）を、今回歩容終端まで前記有限時間整定フィルタを用いて生成することにより求められる。

- 5      尚、次回歩容終端遊脚足平位置姿勢は、その位置姿勢から足平22を接地させたまま、つま先を下げるように該足平22を水平姿勢までピッチ方向に所定角度回転させたときの該足平の位置姿勢が次次回歩容支持脚座標系の位置姿勢に合致するように決定される。換言すれば、次回歩容終端遊脚足平位置姿勢は、前記要求パラメータにおける2歩目の遊脚
- 10   側足平22の着地位置姿勢の要求値から、該足平22をすべらないように接地させたまま、つま先を持ち上げるように該足平22をピッチ方向に所定角度回転させた状態（つま先を上げてかかとを接地させた状態）での該足平22の位置姿勢である。

- また、第1巡回歩容初期支持脚足平位置姿勢は、次回歩容支持脚座標
- 15   系から見た今回歩容終端遊脚足平位置姿勢とされる。この場合、今回歩容終端遊脚足平位置姿勢は、前記次回歩容終端遊脚足平位置姿勢の場合と同様、前記次回歩容支持脚座標系もしくはこれに対応する前記要求パラメータの1歩目（今回歩容）の遊脚着地予定位置姿勢の要求値に依じて定まるものである。すなわち、該今回歩容終端遊脚足平位置姿勢は、
- 20   その位置姿勢から、足平22を接地させたまま、つま先を下げるように該足平22を回転させて該足平22の底面のほぼ全面を床面に接地させたときの該足平の代表点が次回歩容支持脚座標系の原点に合致するように決定される。

- 第1巡回歩容終端遊脚足平位置姿勢は、今回歩容終端遊脚足平位置姿
- 25   勢や次回歩容終端遊脚足平位置姿勢の決定手法と同様に、次回歩容支持脚座標系から見た次次回歩容支持脚座標系の位置姿勢に基づいて決定さ

れる。より具体的には、第1巡回歩容終端遊脚足平位置姿勢は、その位置姿勢から足平22を接地させたまま、すべらないように該足平22を水平姿勢まで所定角度回転させたときの足平位置姿勢が、次回歩容支持脚座標系から見た次次回歩容支持脚座標系の位置姿勢に合致するように設定される。

第1巡回歩容終端では、支持脚足平22は離床して空中にある。支持脚足平22が離床してから後の軌道を決定するために、第1巡回歩容支持脚足平着地予定位置姿勢が設定される。第1巡回歩容支持脚足平着地予定位置姿勢は、次回歩容支持脚座標系から見た次次回歩容支持脚座標系の位置姿勢に基づいて設定される。より具体的には、第1巡回歩容支持脚足平着地予定位置姿勢は、次回歩容支持脚座標系から見た次次回歩容支持脚座標系の位置姿勢である。なお、次次回歩容支持脚座標系は、次次回歩容支持脚座標系と次次回歩容支持脚座標系との相対的位置姿勢関係が、今回歩容支持脚座標系と次回歩容支持脚座標系との相対的位置姿勢関係と一致するように設定される。

第1巡回歩容終端支持脚足平位置姿勢は、第1巡回歩容初期支持脚足平位置姿勢を求めた場合と同様に、第1巡回歩容初期支持脚足平位置姿勢から、前記第1巡回歩容支持脚足平着地予定位置姿勢に至る足平位置姿勢軌道（より詳しくは次回歩容支持脚座標系から見た軌道）を、第1巡回歩容終端まで前記有限時間整定フィルタを用いて生成することにより求められる。

第2巡回歩容初期遊脚足平位置姿勢は、次次回歩容支持脚座標系から見た第1巡回歩容終端支持脚足平位置姿勢とされる。第2巡回歩容初期支持脚足平位置姿勢は、次次回歩容支持脚座標系から見た第1巡回歩容終端遊脚足平位置姿勢とされる。

第2巡回歩容終端遊脚足平位置姿勢は、今回歩容支持脚座標系から見

た今回歩容終端遊脚足平位置姿勢とされる。第2巡回歩容終端支持脚足平位置姿勢は、今回歩容支持脚座標系から見た今回歩容終端支持脚足平位置姿勢とされる。

第1巡回歩容および第2巡回歩容の歩容周期は、次回歩容周期と同一に設定される。これらの第1巡回歩容及び第2巡回歩容の歩容周期は、互いに同一にすることは必ずしも必要ではないが、いずれの周期も、少なくとも次回歩容周期に応じて決定するのが好ましい。尚、今回歩容、第1巡回歩容および第2巡回歩容の上記以外の運動パラメータ（両脚支持期時間などの時間パラメータを含む）は、上記決定されたパラメータに応じて、歩容の条件（アクチュエータの速度が許容範囲に入っているか、可動角を超えていないか、床などと干渉していないかなど）を満足するように適宜決定する。

次に、S102に進み、目標上体姿勢が追従すべき基準上体姿勢軌道を規定する基準上体姿勢軌道パラメータが決定される。基準上体姿勢は、定常歩容の初期（第1巡回歩容の初期）と終端（第2巡回歩容の終端）とでつながるように（定常歩容の初期、終端での基準上体姿勢の姿勢角及びその角速度が一致するように）に設定されている限り、一定姿勢である必要はないが、本実施形態では理解を容易にするため、基準上体姿勢は、直立姿勢（鉛直姿勢）に設定される。つまり、本実施形態では、基準上体姿勢は、定常歩容の全期間において直立姿勢に設定される。従って、本実施形態では、基準上体姿勢の姿勢角の角速度及び角加速度は0である。

次に、S104に進み、腕姿勢軌道パラメータ、より詳しくは鉛直軸（あるいは上体体幹軸）まわりの両腕体の角運動量変化に関すること以外の腕姿勢軌道パラメータが決定される。たとえば、上体24に対する腕体の手先の相対高さや腕全体の相対重心位置などの腕姿勢軌道パラメ

一タが決定される。尚、本実施形態では、腕全体の相対重心位置は、上体に対して一定に維持されるように設定される。

次に、S106に進み、床反力鉛直成分軌道パラメータが設定される。この場合、該パラメータにより規定される床反力鉛直成分軌道が、第1  
5 旋回歩容および第2旋回歩容のいずれにおいても図6のように実質的に連続な（値がステップ状に飛ばない）ものとなるように床反力鉛直成分軌道パラメータが設定される。すなわち、定常旋回歩容の目標床反力鉛直成分軌道は図17のようなパターンで設定される。そのパターンでは、  
10 第1旋回歩容及び第2旋回歩容のいずれにおいても、片脚支持期では床反力鉛直成分が台形状に変化し、空中期では床反力鉛直成分が0に維持される。そして、このパターンの折れ点の時刻や、台形部分の高さ（ピーク値）が床反力鉛直成分軌道パラメータとして設定される。

この床反力鉛直成分軌道パラメータの設定に際しては、床反力鉛直成分の歩容全期間（第1旋回歩容と第2旋回歩容両方の期間を合わせた期  
15 間で定常歩容の1周期の期間）における平均値をロボット1の自重と一致させる。すなわち、床反力鉛直成分の平均値がロボット1に作用する重力と同じ大きさで反対向きになるようにする。

上記のごとく床反力鉛直成分軌道を設定することは、定常歩容の条件を満たすために必要である。定常歩容の条件とは、支持脚座標系（支持  
20 脚側足平22の接地面に設定された座標系）から見た歩容のあらゆる状態変数（ロボット1の各部の位置、姿勢、速度等）の初期状態（第1旋回歩容の初期状態）と次の支持脚座標系（次の第1旋回歩容の支持脚座標系）から見た歩容の終端状態（第2旋回歩容の終端状態）が一致していることである（以下、この条件を定常歩容の境界条件ということがあ  
25 る）。したがって、定常歩容終端におけるロボット1の全体重心鉛直速度と定常歩容初期における全体重心鉛直速度との差（詳細には、第2旋

回歩容終端の全体重心鉛直速度と第1旋回歩容初期の全体重心鉛直速度との差)も零でなければならない。上記差は床反力鉛直成分と重力との差の積分値(1階積分値)であるから、上記差を零にするためには、上記のごとく床反力鉛直成分軌道を設定する必要がある。

- 5      尚、本実施形態では、床反力鉛直成分の第1旋回歩容、第2旋回歩容それぞれの期間における平均値をロボット1の自重と一致させるようにした。より具体的には、例えば第1旋回歩容及び第2旋回歩容の歩容周期に応じて各旋回歩容における床反力鉛直成分軌道の台形部分の折れ点の時刻を設定した上で、その台形部分の高さを、床反力鉛直成分の第1  
10 旋回歩容、第2旋回歩容それぞれの期間における平均値がロボット1の自重と一致するように決定した(台形の高さを未知数として、上記平均値及び自重の一致条件を表す方程式を解くことで台形の高さを求める)。

- こうすることにより、第1旋回歩容終端の全体重心鉛直速度と第1旋回歩容初期の全体重心鉛直速度との差も0、第2旋回歩容終端の全体重心鉛直速度と第2旋回歩容初期の全体重心鉛直速度との差も0になる。  
15      ただし、このようにする必然性はない。例えば、第1旋回歩容と第2旋回歩容との境界あたりで上体鉛直位置が高くなり過ぎたり低くなり過ぎたりして無理な姿勢になりそうな場合には、各旋回歩容で上記平均値及び自重を一致させた状態から各旋回歩容の床反力鉛直成分軌道の台形の  
20 高さ等を修正するようにしてもよい。

- 次に、S108に進み、上記のごとく図17のように設定された床反力鉛直成分軌道に応じて、単純化モデル歩容用(より詳しくは、単純化モデル歩容の定常歩容用)の床反力水平成分の許容範囲[Fxmin, Fxmax](より詳しくはこれを規定するパラメータ)が図18のように  
25 設定される。図18の負側の折れ線が床反力水平成分許容下限値 Fxmin、正側の折れ線が床反力水平成分許容上限値 Fxmax を表す。こ



これらの設定方法に関して以下に補足する。以下では、床面が水平である場合について説明する。

床反力水平成分は、床と足平 2 2 との間の摩擦によって発生するが、摩擦はいくらでも発生できるわけではなく、限界がある。したがって、生成された目標歩容に従って実際のロボット 1 が移動した時にスリップしないようにするためには、目標歩容の床反力水平成分が、常に摩擦限界以内になければならない。そこで、この条件を満足させるために、床反力水平成分許容範囲を設定し、後述するように、目標歩容の床反力水平成分がこの許容範囲内になるように、目標歩容を生成することとした。

- 10 床と足平 2 2 との間の摩擦係数を  $\mu$  とすると、 $F_{xmin}$  は、常に  $-\mu * \text{床反力鉛直成分}$  以上に、 $F_{xmax}$  は  $\mu * \text{床反力鉛直成分}$  以下に設定されなければならない。最も単純な設定方法は、次式による設定である。ただし、 $k_a$  は 1 より小さい正の定数である。

$$F_{xmin} = -k_a * \mu * \text{床反力鉛直成分}$$

15  $F_{xmax} = k_a * \mu * \text{床反力鉛直成分}$

…式 c 1 2

- 図 1 8 の床反力水平成分許容範囲は、式 c 1 2 にしたがって設定した例である。床反力水平成分許容範囲を規定するパラメータとして、図 1 8 の台形波形などの折れ点での値と時刻を設定してもよいが、式 c 1 2 により床反力水平成分許容範囲を決定するときには、単に式 c 1 2 における  $(k_a * \mu)$  の値をパラメータとして設定するだけでも良い。

- 尚、上記条件（目標歩容の床反力水平成分を常に摩擦限界以内にするという条件）を満足しているならば、他の設定方法で床反力水平成分許容範囲を設定するようにしても構わない。また、単純化モデル歩容用の床反力水平成分許容範囲は、仮歩容（単純化モデル歩容）を生成するために使用するものであるので、必ずしも厳密な摩擦限界に基づいて決定

する必要はなく、例えば片脚支持期の床反力水平成分許容範囲を摩擦限界を越えるような範囲に設定してもよい。このことは、空中期でも同様である。

次に、S 1 1 0に進み、第1旋回歩容および第2旋回歩容を合わせた  
5 定常歩容のZMP軌道を規定するZMP軌道パラメータが設定される。  
この場合、目標ZMP軌道は、前述したように安定余裕が高くかつ急激な変化をしないように設定される。

さらに詳細には、図5の走行歩容においては、支持脚足平22のかかとで着地した後、しばらくして該支持脚足平22の底面のほぼ全面が接  
10 地し、さらにしばらくして、支持脚足平22のつま先だけが接地する。  
そして、次に支持脚足平22のつま先で蹴って空中に飛び上がり、最後に遊脚足平22のかかとで着地する。また、目標ZMPは接地面内に存在しなければならない。そこで、本実施形態では、定常歩容の第1旋回歩容及び第2旋回歩容のそれぞれの目標ZMPのX軸方向の位置は、前  
15 記図7の上段図に示したように、支持脚足平22のかかとを初期位置として、該足平22の底面のほぼ全体が接地するまでその位置に留まるように設定される。次に、目標ZMPは支持脚足平22の中央に移動し、該足平22がつま先接地状態になるまでにつま先に移動し、その後、離床時まで支持脚足平22のつまさきに留まるように設定される。さらに  
20 その後は、目標ZMPは、前述のごとく、次の遊脚足平22の着地までに目標ZMPが、支持脚足平22のつまさきから遊脚足平22のかかとの着地位置まで連続的に移動するように設定される。したがって、第1旋回歩容と第2旋回歩容とから成る定常歩容の目標ZMP軌道（X軸方向の軌道）は、図19のようになる。そして、この目標ZMP軌道の折  
25 れ点の時刻及び位置がZMP軌道パラメータとして設定される。この場合、折れ点の時刻は、前記要求パラメータに応じて定めた第1旋回歩容

及び第2巡回歩容の歩容周期に応じて設定され、該折れ点の位置は、次回歩容支持脚座標系及び次次回歩容支持脚座標系の位置姿勢あるいはこれらの座標系を規定する要求パラメータの1歩目及び2歩目の遊脚側足平着地予定位置姿勢の要求値に応じて設定される。尚、ZMP軌道のY

5 軸方向の位置は、前記図7の下段図に示したものと同様に設定される。より詳しくは、第1巡回歩容における目標ZMPのY軸方向位置の軌道は、図7の下段図のものと同一パターンで設定され、第2巡回歩容における目標ZMPのY軸方向位置の軌道は、第1巡回歩容のものと同じ形の軌道で、該軌道の終端につながるものに設定される。

10 最後に、S112に進み、定常歩容1歩（1周期）の初期時刻、終端時刻、期間が以下のように再定義される。

定常歩容は、その初期と終端での状態変数が連続的につながる歩容でなければならない。このような歩容の決定を容易にするために、本実施形態では、定常歩容を決定するまでは、前述の狭義の歩容の定義とは異

15 なり、定常歩容の1歩の初期、終端、期間を便宜上、図17のように定める。すなわち、第1巡回歩容の片脚支持期の後半において床反力鉛直成分がある程度減少した時刻を定常歩容の初期時刻  $T_s$  として設定する。なお、初期時刻  $T_s$  は、図7に示すように、支持脚足平22の底面のほぼ全面が接地した状態からつま先接地に変わる瞬間あるいはその直前の

20 時刻（図7の足底全面接地期間の終了時刻もしくはその直前の時刻）に設定するのが望ましい。また、S110において設定した図19（または図7）に示す目標ZMPと時刻  $T_s$  との関係を説明すると、第1巡回歩容において支持脚足平22の底面のほぼ全面が接地した後に、目標ZMPが支持脚足平22の中央に移動し、つま先接地状態になるまでにつ

25 ま先に移動を完了した瞬間が、時刻  $T_s$  となっているのが望ましい。このような初期時刻  $T_s$  は例えば先に設定した目標ZMP軌道パラメータ

に応じて設定される。上記のごとく初期時刻  $T_s$  を設定する理由は後述する。

また、図 17 に示すように、定常歩容の周期  $T_{cyc}$  は第 1 旋回歩容と第 2 旋回歩容の歩容周期の和である。定常歩容の終端時刻を  $T_e$  とする。

5  $T_e$  は、 $T_s$  に  $T_{cyc}$  を加えた時刻に設定される。

定常歩容が決定された時点（後述の図 20 の S 204 のループを抜けた時点）から、改めて、歩容の初期、終端等の定義を、前述の狭義の歩容の定義に戻すこととする。以下の説明では、前述の狭義の歩容の定義による初期時刻（支持脚側足平 22 の着地当初の時刻）を 0 とし、定常歩容を決定するまで用いる上記初期時刻  $T_s$  を参照符号  $T_s$  を用いて  
10 （単に「 $T_s$ 」と省略することもある）本来の初期時刻 0 と区別する。

図 13 の S 010 から S 022 までに示す処理が行われた後、S 024 に進み、定常歩容の初期状態が算出される。ここで算出される初期状態は、定常歩容の初期上体水平位置速度（水平方向での初期上体位置及び初期上体速度）、初期上体鉛直位置速度（鉛直方向での初期上体位置及び初期上体速度）、初期発散成分、初期上体姿勢角およびその角速度  
15 である。この初期状態の算出は、図 20 のフローチャートに従って、探索的に行なわれる。

図 20 のフローチャートにおいては、まず、S 200 において、定常歩容の歩容パラメータ（前記図 13 の S 022 で設定したパラメータ）  
20 に基づいて、目標足平位置姿勢、目標腕姿勢、および目標上体姿勢角（姿勢角と方向）の初期状態（初期時刻  $T_s$  での状態）が決定される。ここで状態とは、位置や姿勢角とその変化率（時間微分）とを表す。

この場合、支持脚側の目標足平位置姿勢の初期状態は、前記図 15 の  
25 S 100 で決定した足平軌道パラメータの第 1 旋回歩容初期支持脚足平位置姿勢から、第 2 旋回歩容終端遊脚足平位置姿勢に至る足平位置姿勢

軌道（次回歩容支持脚座標系から見た軌道）を時刻  $T_s$  まで有限時間整定フィルタにより生成することにより決定される。遊脚側の目標足平位置姿勢の初期状態は、次回歩容支持脚座標系から見た今回歩容初期支持脚足平位置姿勢から、第1巡回歩容終端遊脚足平位置姿勢に至る足平位置姿勢軌道を時刻  $T_s$  まで有限時間整定フィルタにより生成することにより決定される。また、目標腕姿勢の初期状態は、図15のS104で決定した腕姿勢軌道パラメータに基づいて時刻  $T_s$  における腕姿勢（上体24に対する両腕体の全体重心位置等）を求めることで決定される。また、目標上体姿勢角の初期状態は、図15のS102で決定した基準上体姿勢軌道パラメータにより定まる時刻  $T_s$  における基準上体姿勢（姿勢角）及びその角速度が該目標上体姿勢角の初期状態として決定される。なお、本実施形態では、基準状態姿勢角は鉛直姿勢であるので、目標上体姿勢角の初期状態（姿勢角及びその角速度）は0である。また、本実施形態では、定常歩容の目標足平位置姿勢軌道、床反力鉛直成分軌道、及び目標ZMP軌道は、それぞれ、図15のフローチャートで決定した足平軌道パラメータ、床反力鉛直成分軌道パラメータ、ZMP軌道パラメータにより互いに独立的に決定される。例えば定常歩容の瞬時瞬時の目標足平位置姿勢は、床反力鉛直成分の瞬時値に依存することなく足平軌道パラメータに応じて決定される。

次いでS202において初期上体水平位置速度の候補（すなわち初期時刻  $T_s$  での上体水平位置速度候補）である  $(X_s, V_{xs})$  ( $X_s$ : 水平位置、 $V_{xs}$ : 水平速度) が仮決めされる。ここで仮決めする候補  $(X_s, V_{xs})$  は、任意でよいが、例えば前回歩容の生成時に求めた定常歩容の初期状態における上体水平位置速度を仮決め候補  $(X_s, V_{xs})$  とすればよい。

尚、説明を簡略にするため、サジタルプレーン上でX方向（前後方

向)での定常歩容の初期状態を探索する場合を例にとるが、実際には位置・速度ともX方向(前後方向)、Y方向(左右方向)を別々にあるいは同時に定常歩容の初期状態(定常歩容の前記境界条件を満たす初期状態)を探索する必要がある。

- 5 探索的な決定手法としては、擬似ヤコビアン(感度マトリックス)を求め、最急降下法などにより次候補を決定する方法や、シンプレックス法などを用いれば良い。本実施例では、最急降下法を用いる。

次いで、S 2 0 4を経てS 2 0 6において、初期(時刻  $T_s$ ) 上体鉛直位置速度( $Z_s$ 、 $V_{zs}$ )( $Z_s$ : 鉛直位置、 $V_{zs}$ : 鉛直速度)が決定される。

初期上体鉛直速度  $V_{zs}$  は、本実施形態では以下のように解析的に決定される。

ロボット1には、動力学的関係として、次式が成立する。

- 15 終端全体重心鉛直位置－初期全体重心鉛直位置  
 = (床反力鉛直成分／ロボットの全体質量) の2階積分  
 + 重力加速度の2階積分  
 + 初期全体重心鉛直速度 \* 1歩の時間

…式 c 1 3

- 20 (ただし、重力加速度は負の値とする。)

また、定常歩容では、終端全体重心鉛直位置と初期全体重心鉛直位置は一致するので、上式 c 1 3 の右辺は零にならない。したがって、これらの関係から初期全体重心鉛直速度を求めることができる。

- 25 具体的には、まず、前記図 1 5 の S 1 0 4 で設定した床反力鉛直成分パラメータによって算出される床反力鉛直成分をロボット1の全体質量で

割った値を1歩の期間（時刻  $T_s$  から時刻  $T_e$  まで）2階積分することにより、床反力鉛直成分による全体重心移動量（式 c 1 3 の右辺第1項）が求められる。さらに、重力加速度を一步の期間2階積分することにより、重力による全体重心移動量（式 c 1 3 の右辺第2項）が求められる。そして、上記求めた床反力による全体重心移動量と重力による全体重心移動量との和を符号反転し、これを1歩の時間（定常歩容の1周期  $T_{cycl}$  の時間）で割ることにより、初期全体重心鉛直速度が求められる。

次に、初期上体鉛直位置  $Z_s$  を求めるために、次式を用いて、時刻 0 の全体重心鉛直速度が求められる。この際、次式における時刻  $T_s$  の全体重心鉛直速度には、式 c 1 3 に基づいて上記の通り求めた値を代入し、積分期間は時刻 0 から時刻  $T_s$  までとする。

時刻  $T_s$  の全体重心鉛直速度－時刻 0 の全体重心鉛直速度  
 =（床反力鉛直成分／ロボットの全体質量）の1階積分  
 + 重力加速度の1階積分

…式 c 1 4

（ただし、重力加速度は負の値とする。）

次に、本出願人が先に特開平 10-86080 号公報で提案した上体高さ決定手法を用いて時刻 0 における（すなわち着地瞬間における）上体高さ（上体鉛直位置）が決定される。このとき、時刻 0 における足平位置姿勢（前記図 15 の S 1 0 0 で決定した第1巡回歩容初期（時刻 0）支持脚足平位置姿勢及び第1巡回歩容初期（時刻 0）遊脚足平位置姿勢）と、各脚体 2 の膝部の曲げ角に関する所定の幾何学的条件とに基づいて、時刻 0 での各脚体 2 の膝部が伸び切らないような上体鉛直

位置（上体高さ）が決定される。具体的には、支持脚側脚体2の膝曲げ角を $\theta_{sup}$ 、遊脚側脚体2の膝曲げ角を $\theta_{swg}$ としたとき、例えばそれらの膝曲げ角 $\theta_{sup}$ 、 $\theta_{swg}$ の正弦値の逆数の和がある所定値（有限値）になるように、上体鉛直位置が決定される。ここで、膝曲げ角 $\theta_{sup}$ 、 $\theta_{swg}$ は、各脚体2の大腿部の軸心に対する下腿部の軸心の角度であり、各脚体2が伸びきった状態から膝部を曲げていくに伴い、0から増加していく角度である。なお、このような上体24の鉛直位置の決定手法は、上記特開平10-86080号公報に詳細に説明されているので、ここでは以上の説明に留める。

次に、このように決定した時刻0における上体鉛直位置や、足平位置姿勢などから時刻0における全体重心鉛直位置が前記単純化モデルを用いて求められる。例えば図11の単純化モデルに対応する前記式b11のキネマティクスモデルを用いることで、時刻0における全体重心鉛直位置が求められる。具体的には、時刻0での上体鉛直位置と上体姿勢角（本実施形態では0）とから上体質点24mの鉛直位置が求められ、時刻0での支持脚足平位置姿勢及び遊脚足平位置姿勢（これらは、前記図15のS100で設定した第1旋回歩容初期支持脚足平位置姿勢及び第1旋回歩容初期遊脚足平位置姿勢である）とからそれぞれ支持脚質点2m及び遊脚質点2mの鉛直位置が求められる。そして、これらの求めた上体質点24m、支持脚質点2m及び遊脚質点2mの鉛直位置を、前記式b11の $Z_b$ 、 $Z_{sup}$ 、 $Z_{swg}$ に代入することで、全体重心鉛直位置（式b11の $Z_{Gtotal}$ ）が求められる。尚、ロボット1のより厳密なモデル（例えば図12に示すようなフルモデル（多質点モデル））を用い、時刻0での上体水平位置や腕姿勢をも考慮して、時刻0での全体重心鉛直位置を求めるようにしてもよい。

次に、前記式c13において、上記求めた時刻0における全体重心鉛



直位置を同式 c 1 3 の左辺の初期全体重心鉛直位置に代入し、上記求めた時刻 0 の全体重心鉛直速度を同式 c 1 3 の右辺の初期全体重心鉛直速度に代入し、さらに、同式 c 1 3 の 1 歩の時間を  $T_s$  とし、積分期間を時刻 0 から時刻  $T_s$  までとすることで、式 c 1 3 の左辺の終端全体重心鉛直位置の値が算出され、この算出値が初期（時刻  $T_s$ ）全体重心鉛直位置として得られる。さらに、この求めた初期（時刻  $T_s$ ）全体重心鉛直位置と時刻  $T_s$  における足平位置姿勢（S 2 0 0 で求めたもの）などから、ロボット 1 のモデル（例えば式 0 4 のキネマティクスモデル）を用いて、初期（時刻  $T_s$ ）上体鉛直位置  $Z_s$  が求められる。具体的には、

10 時刻  $T_s$  における支持脚及び遊脚の各平位置姿勢から、図 1 1 のモデルの支持脚質点 2 m 及び遊脚質点 2 m の鉛直位置が求められ、これらの鉛直位置と、上記求めた初期（時刻  $T_s$ ）全体重心鉛直位置とを式 b 1 1 に適用することで、上体質点 2 4 m の鉛直位置（式 b 1 1 の  $Z_b$ ）が求められる。そして、この上体質点 2 4 m の鉛直位置と時刻  $T_s$  での上体

15 姿勢（本実施形態では 0）とから逆算的に初期（時刻  $T_s$ ）上体鉛直位置  $Z_s$  が求められる。尚、この場合も、より厳密なモデル（例えば図 1 2 のフルモデル）を用い、上体水平位置や腕姿勢をも考慮して初期上体鉛直位置  $Z_s$  を求めるようにしてもよい。

最後に、前記 S 2 0 0 で決定した足平位置姿勢の初期状態や、S 2 0

20 6 で求めた初期全体重心鉛直速度等から、ロボット 1 のモデル（例えば式 b 1 1 のキネマティクスモデル）を用いて、初期上体鉛直速度が求められる。具体的には、式 b 1 1 の両辺を時間微分してなる式に、前記式 c 1 3 に基づいて求めた初期全体重心鉛直速度と、支持脚側及び遊脚側の各足平位置姿勢の初期状態により定まる支持脚質点 2 m 及び遊脚質点

25 2 m の鉛直速度とを適用することで、上体質点 2 2 m の鉛直速度が求められる。そして、この上体質点 2 2 m の鉛直速度と上体姿勢角の初期状

態（S 2 0 0 もしくは後述の S 2 0 8 で決定されたもの）とから、上体鉛直速度が求められる。尚、各足平位置姿勢の初期状態や、初期全体重心鉛直速度のほか、腕姿勢の初期状態（S 2 0 0 で決定されたもの）、仮決定した上体水平位置の初期状態（S 2 0 2 もしくは後述の S 2 1 6 もしくは S 2 1 8 で仮決定された最新のもの）、上記求めた初期上体鉛直位置を考慮し、上記求めた初期全体重心鉛直速度を満足するような初期上体鉛直速度を、ロボット 1 のより厳密なモデル（例えば図 1 2 のフルモデル）を用いて求めるようにしてもよい。

補足すると、ロボット 1 のモデルが図 1 2 のような複雑なもの（厳密なモデル）であっても、ロボット 1 は、片脚当たり 6 自由度であることから、足平位置姿勢軌道および上体位置姿勢軌道の初期状態（位置姿勢とその変化率）が与えられれば、ロボットの初期状態は一義的にすべて決定されることになる。したがって、初期全体重心鉛直速度もこれらが与えられれば一義的に決定される。逆に、片脚当たり 6 自由度であることから、足平位置姿勢軌道および上体位置姿勢軌道の初期状態の中で速度に関する状態のひとつ（例えば初期上体鉛直速度）が未定であっても、初期全体重心鉛直速度が与えられれば、未定の初期状態は一義的に決定される。

S 2 0 6 の処理の後、次いで S 2 0 8 に進み、定常旋回歩容が仮に生成される。より具体的には、前記図 1 3 の S 0 2 2 で決定した定常歩容の歩容パラメータを基に、初期時刻  $T_s$  から終端時刻  $T_e$  までの各瞬間における目標 ZMP、目標床反力鉛直成分、目標足平位置姿勢、基準上体姿勢、目標腕姿勢および床反力水平成分許容範囲が逐次求められる。そして、求めた目標 ZMP と目標床反力鉛直成分とに関する動力学的平衡条件、並びに床反力水平成分許容範囲の条件を満足するように、前記図 1 1 の単純化モデル（動力学モデル）を用いて、前記上体水平位置速

度 ( $X_s$ ,  $V_{xs}$ )、上体鉛直位置速度 ( $Z_s$ ,  $V_{zs}$ ) を上体 24 の初期 (時刻  $T_s$ ) 状態として、上体位置姿勢を逐次決定することによって、時刻  $T_s$  から終端時刻  $T_e$  までの歩容 (定常歩容の仮歩容) を生成する。また、この時、上体姿勢は、基準上体姿勢になるべく一致するように生成される。

尚、この定常歩容の歩容生成は歩容生成装置 100 の内部で行われるだけであって、実際のロボット 1 を駆動するための目標値として、後述する複合コンプライアンス動作決定部 104 に出力されることはない。

以下に、S 208 の処理である逐次演算による定常歩容生成処理の詳細を説明する。

図 21 はその処理を示すサブルーチンフローチャートである。

以下説明すると、S 300 において、諸々の初期化が行われる。具体的には、仮歩容生成用時刻  $k$  に初期時刻  $T_s$  を代入する。さらに、上体水平位置速度に、現在仮決定されている ( $X_s$ ,  $V_{xs}$ ) (図 20 の S 202 もしくは後述の S 216 もしくは S 218 で決定されたもの) が代入され、上体鉛直位置速度に、前記 S 206 で求めた最新の ( $Z_s$ ,  $V_{zs}$ ) が代入される。また、目標上体姿勢角には、基準上体姿勢角初期値 (時刻  $T_s$  での基準上体姿勢角)、目標上体姿勢角速度には、基準上体姿勢角速度初期値 (時刻  $T_s$  での基準上体姿勢角速度) を代入する。補足すると、後述するごとく最終的には初期目標上体姿勢角速度は変更されるので、基準上体姿勢角速度初期値と異なる値を代入しても良い。

次いで、S 302 を経て S 304 において、仮歩容生成用時刻  $k$  が歩容終端時刻以前であるか否か ( $k \leq T_s + T_{cyc}$  であるか否か) が判断され、その判断結果が YES である場合には、S 306 の歩容瞬時値決定サブルーチンに進み、歩容瞬時値が決定される。次いで歩容生成装置 100 の処理は、S 308 に進み、仮歩容生成用時刻  $k$  を  $\Delta k$  だけ増

やした後、S 3 0 4に戻る。

ここで、 $\Delta k$  は、仮歩容生成のインターバルであり、通常、制御周期  $\Delta t$  と一致させておけば良い。なお、 $\Delta k$  は、仮歩容の動学的精度を落としても良いならば、演算量を低減するために、 $\Delta k$  を  $\Delta t$  よりも長く設定しても良い。

S 3 0 4の判断結果がNOである場合には、S 3 1 0に進む。以上の処理により、S 3 1 0に進むまでに定常歩容が初期から終端まで生成される。

以下に、S 3 0 6の歩容瞬時値決定サブルーチンの詳細を図 2 2を参照して説明する。

まず図 2 2のS 4 0 0において、定常歩容パラメータ（床反力鉛直成分軌道パラメータ）を基に、前記図 1 7に示した目標床反力鉛直成分の時刻  $k$  における値（今回値）が求められる。さらに、S 4 0 2において、定常歩容パラメータ（ZMP軌道パラメータ）を基に、前記図 1 9に示した目標ZMP軌道の時刻  $k$  における値（今回値）が求められる。

次いでS 4 0 4に進み、定常歩容パラメータ（足平軌道パラメータ、基準上体姿勢軌道パラメータ、及び腕姿勢軌道パラメータ）を基に、時刻  $k$  における目標両足平位置姿勢（支持脚側及び遊脚側の両者の目標足平位置姿勢）、基準上体姿勢および目標腕姿勢の値（今回値）が求められる。ただし、目標腕姿勢に関しては、より詳しくは両腕体の全体重心位置が決定されるが、鉛直軸（または上体体幹軸）まわりの角運動量を変化させる腕体の運動（腕振り運動）は、未だ決定されていない。尚、目標足平位置姿勢の今回値（時刻  $k$  での値）は、前記図 2 0のS 2 0 0で初期時刻  $T_s$  での足平位置姿勢を求めた場合と同様に求められる。

次いでS 4 0 6に進み、目標床反力鉛直成分を満足する（ロボット1の鉛直方向の慣性力と重力との和を目標床反力鉛直成分に釣り合わせ

る) ような時刻  $k$  における全体重心鉛直位置速度の値 (今回値) が算出される。具体的には、前記図 11 の単純化モデルに係わる前記式 a 8 と式 b 11 とに基づいて、全体重心鉛直位置速度が算出される。すなわち、式 a 8 と式 b 11 とによれば、ロボット 1 の運動による全体重心鉛直加速度と重力加速度との和にロボット 1 の全体質量を乗算したものが床反力鉛直成分に等しいという関係式 (ロボット 1 の全体重心の鉛直方向に関する運動方程式) が得られる。従って、この関係式と目標床反力鉛直成分とから、全体重心鉛直加速度が求められる。

尚、この関係式自体は、ロボット 1 のモデルに依存することなく一般的に成立するものである。そして、この求めた全体鉛直加速度を積分することにより、全体重心鉛直速度が算出され、さらにその全体重心鉛直速度を積分することにより、全体重心鉛直位置が算出される。これらの算出は、より一般的には、次式 c 15 および式 c 16 で表される動力学関係式 (ニュートンの運動方程式を離散化した式) を用いて行なわれる。

時刻  $k$  における全体重心鉛直速度

$$= \text{時刻}(k - \Delta k) \text{ における全体重心鉛直速度} \\ + ((\text{床反力鉛直成分} / \text{ロボットの全体質量}) + \text{重力加速度}) * \Delta k \\ (\text{ただし、重力加速度は負の値とする。})$$

…式 c 15

時刻  $k$  における全体重心鉛直位置

$$= \text{時刻}(k - \Delta k) \text{ における全体重心鉛直位置} \\ + \text{時刻 } k \text{ における全体重心鉛直速度} * \Delta k$$

…式 c 16

次いで S 408 に進み、全体重心鉛直位置を満足する上体鉛直位置が算出される。具体的には、前記図 11 の単純化モデルに係わる式 b 11

を用いて上体鉛直位置が算出される。すなわち、支持脚側及び遊脚側の目標足平位置姿勢の今回値から、図11の単純化モデルの支持脚質点2m及び遊脚質点2mの鉛直位置が求められる。そして、これらの求めた支持脚質点2m及び遊脚質点2mの鉛直位置と、S407で求めた全体重心鉛直位置の今回値とを式b11に適用することで、上体質点24mの鉛直位置が求められる。さらに、この求めた上体質点24mの鉛直位置と目標上体姿勢角の現在値（S404で設定された今回値または後述のS414で決定された前回（時刻 $k - \Delta k$ ）の目標上体姿勢角）とから上体鉛直位置が求められる。

- 10 尚、より厳密なモデル（例えば図12に示すようフルモデル）を用いて上体鉛直位置を求めてもよい。この場合には、前記求めた目標両足平位置姿勢の今回値（時刻 $k$ の値）、時刻 $(k - \Delta k)$ の目標上体姿勢（または前記求めた基準上体姿勢の今回値）、前記求めた目標腕姿勢（両腕の重心位置）の今回値、時刻 $(k - \Delta k)$ の上体水平位置と、求めたい上体鉛直位置とから決定される全体重心鉛直位置が、前記求めた全体重心鉛直位置の今回値に一致するように上体鉛直位置が求められる。

- 20 この場合、時刻 $k$ の上体姿勢と上体水平位置は、未だ決定されていないので、代わりに時刻 $(k - \Delta k)$ の値を用いた。より精度を高めるために、時刻 $k$ での推定値を、時刻 $(k - \Delta k)$ での歩容状態から外挿によって求めても良い。

次いでS410に進み、前記図15のS108で決定した歩容パラメータ（床反力水平成分許容範囲を規定するパラメータ）に基づいて、図18に示した床反力水平成分許容範囲 $[F_{xmin}, F_{xmax}]$ の時刻 $k$ における値（今回値）が求められる。

- 25 次いでS412に進み、目標ZMPに関する動力的平衡条件（ロボット1の慣性力と重力との合力が目標ZMPまわりに発生するモーメン

トの水平成分が0であるという条件)を満足するように、前記図11の単純化モデルの基づいて、上体水平加速度と上体姿勢角加速度との今回値が決定される。ただし、床反力水平成分  $F_x$  が  $[F_{xmin}, F_{xmax}]$  を越えず、かつ、上体姿勢角速度が定常歩容の初期と終端とで一致するように、上体水平加速度と上体姿勢角加速度とが決定される。以下にこの詳細を説明する。

この時点において、前記の如く足平位置姿勢および上体鉛直位置の瞬時値(今回値)が決定されているので、残りの上体水平位置と上体姿勢角とを決定すれば、鉛直軸まわりの角運動量を変化させる腕体の運動自由度を除いて、ロボット1の目標運動は一義的に決定できる。したがって、上体水平位置と上体姿勢角とを決定すれば、床反力の鉛直軸まわりのモーメントを除き、すべての床反力も一義的に決定される。なお、本実施形態では、定常歩容の目標床反力鉛直成分及び目標ZMPは、それぞれ前記図12のS022で決定した床反力鉛直成分軌道パラメータ及び目標ZMP軌道パラメータによって規定される。したがって、上体水平位置と上体姿勢角の決定に応じて従属的に決定される床反力は、床反力水平成分のみである。また、補足すると、前述したように、ロボット1は片脚当たり6自由度であることから、目標足平位置姿勢と目標上体位置姿勢とから脚体2の各部の位置姿勢は一義的に決定される。なお、鉛直軸まわりの角運動量を変化させる腕の運動自由度は、後述するように、スピン力を打ち消すために用いられる。

ところで、歩容生成において、前記上体並進モードをあまり用いずに主に上体回転モードを用いることにより、目標ZMPを満足させる(目標ZMPまわりの床反力モーメントの水平成分を0にする)と、上体姿勢角が大きく振れ過ぎてしまう恐れがある。したがって、これを防ぐためには、なるべく上体並進モードを用いるべきである。しかし、上体並

進モードは、床反力水平成分の変化を伴うので、床反力水平成分許容範囲が狭い場合には、上体並進モードを強く働かせるとスリップする恐れがある。この場合には、上体回転モードに頼るしかない。特に、前記走行歩容のように床反力水平成分許容範囲が0となる期間では、床反力水平成分を発生させるような歩容を生成することはできないので、上体回転モードに頼らざるを得ない。以上のことを考慮し、本実施形態では、図23に示すフローチャートに従って、上体水平加速度と上体姿勢角加速度とが決定される。

まず、S500において、初期時刻  $T_s$  から第1旋回歩容の空中期を経て第2旋回歩容になり、床反力鉛直成分がある所定の大きさまで増加した時刻  $T_m$  が設定される。さらに、第2旋回歩容の片脚支持期の後半において床反力鉛直成分がある程度減少した時刻  $T_{s2}$  が設定される。さらに、第2旋回歩容の空中期を経て第1旋回歩容になり、床反力鉛直成分がある所定の大きさまで増加した時刻  $T_{m2}$  が設定される。

図17にこれらの時刻を示す。時刻  $T_m$  は、支持脚足平22の底面のほぼ全面が接地した瞬間あるいはその直後に設定するのが望ましい。時刻  $T_{m2}$  も同様である。また、時刻  $T_{s2}$  は、前記初期時刻  $T_s$  同様、足平22の底面のほぼ全面が接地した状態からつま先接地に変わる瞬間あるいはその直前に設定するのが望ましい。

また、前記図15のS110において設定した図19の目標ZMPとこれらの時刻  $T_m$ 、 $T_{s2}$ 、 $T_{m2}$  との関係を説明すると、第2旋回歩容において、目標ZMPが、支持脚足平22のかかとを初期位置として、該足平22の底面のほぼ全体が接地するまでその位置に留まり、次に支持脚足平22の中央に移動し始める瞬間を時刻  $T_m$  とすることが望ましい。その後、支持脚足平22のつま先だけ接地した状態になるまでに、目標ZMPがつま先に移動を完了した瞬間を、時刻  $T_{s2}$  とすることが望ま



しい。さらに次の第1旋回歩容において、目標ZMPが、支持脚足平22のかかとを初期位置として該足平22の底面のほぼ全体が接地するまでその位置に留まり、次に支持脚足平22の中央に移動し始める瞬間を時刻 $T_{m2}$ とすることが望ましい。

5 上記のごとく設定する理由は後述する。

次にS502において現在時刻（定常歩容作成用タイマーの値） $k$ が、時刻 $T_s$ から $T_m$ の間または時刻 $T_{s2}$ から $T_{m2}$ の間にあるか否かが判定される。S502の判定結果がYESであるならば、S504に進み、NOであるならばS518に進む。

10 S504では、ロボット1の前回瞬時歩容状態（時刻 $k-1$ の歩容状態）から、仮に、上体回転モードの角加速度を0にして、上体並進モードの運動をロボット1にさせた場合に今回（時刻 $k$ ）の目標ZMPを満足する（目標ZMPまわりの床反力モーメントを0にする）ために必要な上体水平加速度 $\alpha_{tmp}$ が求められる。この $\alpha_{tmp}$ は、前記図11の  
15 単純化モデル（動力学モデル）に係わる前記式a10を用いて求められる。より具体的には、例えば、現在時刻 $k$ までに求められた目標足平位置姿勢の時系列値を用いて、現在時刻 $k$ における支持脚質点2m及び遊脚質点2mの鉛直加速度が求められると共に、現在時刻 $k$ （今回）の目標足平位置姿勢を用いて支持脚質点2m及び遊脚質点2mの鉛直位置が  
20 求められる。また、現在時刻 $k$ （今回）の床反力鉛直位置を用いて上体質点24mの鉛直位置が求められると共に、現在時刻 $k$ までに求めた目標上体鉛直位置の時系列値を用いて現在時刻 $k$ における上体質点24mの鉛直加速度が求められる。そして、これらの求めた値を前記式a10に代入すると共に、同式a10の $M_y$ 、 $d^2\theta_{by}/dt^2$ を0にしてなる式を、  
25  $d^2X_b/dt^2$ について解くことにより、上体質点水平加速度 $d^2X_b/dt^2$ が上体水平加速度 $\alpha_{tmp}$ として求められる。

なお、本実施形態では、基準上体姿勢が鉛直姿勢で、基準上体姿勢による上体姿勢角加速度が0であるため、上体回転モードの角加速度を0にして上体水平加速度  $\alpha_{tmp}$  を求めるようにした。但し、基準上体姿勢が変化するように該基準上体姿勢軌道パラメータを設定した場合で、  
 5 それにより定まる現在時刻  $k$  における基準上体姿勢角加速度が0でない場合には、上体回転モードの角加速度をその0でない基準上体姿勢角加速度の値にして、上体水平加速度  $\alpha_{tmp}$  を動力学モデルを用いて求める（例えば式 a 10 の  $d^2\theta_{by}/dt^2$  を0でない基準上体姿勢角加速度に設定して上記と同様に上体水平加速度  $\alpha_{tmp}$  を求める）ようにすれば  
 10 よい。

次に、S 5 0 6 に進み、上体水平加速度が  $\alpha_{tmp}$  の場合の時刻  $k$  における床反力水平成分  $F_{xtmp}$  が前記図 1 1 の単純化モデルに係わる式 a 9 を用いて  $F_{xtmp}$  が求められる。すなわち、次式 c 1 7 によって  $F_{xtmp}$  が求められる。但し、 $d^2X_{sup}/dt^2$  および  $d^2X_{swg}/dt^2$  はそれ  
 15 ぞれ時刻  $k$  における支持脚足平質点水平加速度、遊脚足平質点水平加速度を表す。

$$\begin{aligned}
 F_{xtmp} = & m_b * \alpha_{tmp} + m_{sup} * d^2X_{sup}/dt^2 \\
 & + m_{swg} * d^2X_{swg}/dt^2 \quad \dots \text{式 c 1 7}
 \end{aligned}$$

20

このようにして求められる  $F_{xtmp}$  の例を図 2 4 に示す。図 2 4 に、 $F_{xtmp}$  が床反力水平成分許容範囲  $[F_{xmin}, F_{xmax}]$  を越えている部分を斜線で示す。

次に、S 5 0 8 に進み、上体並進モードの上体水平加速度  $\alpha$ 、これによって発生する床反力水平成分  $F_x$ 、上体回転モードの上体角加速度  $\beta$   
 25 が次のように決定される（S 5 0 8 ～ S 5 1 6）。

すなわち、

$F_{tmp} > F_{max}$  ならば、S 5 1 0 に進み、次式により  $F_x$  が決定される。

$$5 \quad F_x = F_{max} \quad \cdots \text{式 c 1 8}$$

$F_{tmp} < F_{min}$  ならば、S 5 1 2 に進み、次式により  $F_x$  が決定される。

$$10 \quad F_x = F_{min} \quad \cdots \text{式 c 1 9}$$

それ以外、すなわち、 $F_{tmp}$  が、床反力水平成分許容範囲  $[F_{min}, F_{max}]$  内に存するならば、S 5 1 4 に進み、次式により  $F_x$  が決定される。

15

$$F_x = F_{tmp} \quad \cdots \text{式 c 2 0}$$

いずれの場合においても、次いで S 5 1 6 に進み、次式により上体水平加速度  $\alpha$ 、上体姿勢角加速度  $\beta$  が決定される。

20

$$\alpha = \alpha_{tmp} + (F_x - F_{tmp}) / \Delta F_p \quad \cdots \text{式 c 2 1}$$

$$\beta = (\alpha_{tmp} - \alpha) * \Delta M_p / \Delta M_r \quad \cdots \text{式 c 2 2}$$

ただし、 $\Delta F_p$ 、 $\Delta M_p$  および  $\Delta M_r$  はそれぞれ前記式 c 0 6、c 0

25 7、および式 c 0 9 により決定される。

補足すると、より動力学演算の精度を高めようとするならば、上記の

ごとく上体角加速度  $\beta$  を求めた後、上体並進モードと上記求めた上体角  
加速度  $\beta$  の上体回転モードとを合成した運動が目標 ZMP を満足するよ  
うに、上体並進モードの上体水平加速度  $\alpha$  を、より厳密な動力学モデル  
を用いて解析的あるいは探索的に決定した方がよい。なお、探索的な決  
5 定法としては、擬似ヤコビアン（感度マトリックス）を求め、擬似ニュ  
ートン法などにより次候補を決定する方法や、シンプレックス法などを  
用いればよい。

さらに床反力水平成分  $F_x$  が床反力水平成分許容範囲  $[F_{xmin},$   
 $F_{xmax}]$  を厳密に越えないようにするために、S 5 1 0 においては、 $F_x$   
10  $= F_{xmax}$  かつ目標 ZMP まわりの床反力モーメントの水平成分が 0 に  
なるように、S 5 1 2 においては、 $F_x = F_{xmin}$  かつ目標 ZMP まわり  
の床反力モーメントの水平成分が 0 になるように、上体水平加速度  $\alpha$  と  
上体角加速度  $\beta$  との組を探索的に求めてもよい。

上記のように求められる  $F_x$  を図 2 5 に示す。 $F_x$  は、 $F_{xtmp}$  の値を  
15 床反力水平成分許容範囲  $[F_{xmin}, F_{xmax}]$  から越えないように制限（飽  
和）させたものになっている。より詳しくは、上体並進モードのみによ  
る上体水平加速度  $\alpha_{tmp}$  に応じた  $F_{xtmp}$  が許容範囲  $[F_{xmin}, F_{xmax}]$   
内にある場合には、 $F_{xtmp}$  がそのまま  $F_x$  となる。また、上体並進モー  
ドのみによる上体水平加速度  $\alpha_{tmp}$  に応じた  $F_{xtmp}$  が許容範囲  $[F_{xmin},$   
20  $F_{xmax}]$  の上限を超え、もしくは下限を下回った場合には、それぞれ  $F_x$   
は、それぞれ強制的に  $F_{xmax}$ 、 $F_{xmin}$  に制限される。特に走行歩容の  
空中期では、常に、 $F_{xmax} = F_{xmin} = 0$  であるので、 $F_x = 0$  となる。

また、上記のように求められる上体姿勢角加速度  $\beta$  を図 2 6 に示す。  
上体並進モードによって発生する  $F_x$  が許容範囲  $[F_{xmin}, F_{xmax}]$  を越  
25 えないように、上体並進モードの加速度を制限したことによって不足し  
た床反力モーメント（より詳しくは目標 ZMP 回りの床反力モーメント

の水平成分を0にする上で必要な慣性力モーメントから、制限した上体  
水平運動と両脚体2, 2の運動とによるモーメント成分を差し引いたモー  
メント)を、上体回転モードで補ったことになる。なお、走行歩容の  
空中期では、上体並進モードによる上体水平加速度 $\alpha$ は常に0に制限さ  
5 れることとなるので、上体回転モードによる上体姿勢角加速度 $\beta$ のみに  
よって、上記不足分の床反力モーメントが補われることとなる。

以上が、時刻 $k$ が時刻 $T_s$ から $T_m$ の間または時刻 $T_{s2}$ から $T_{m2}$ の  
間の場合の処理である。

S 5 0 2の判定結果がNOである場合には以下の処理が行われる。ま  
10 ず、S 5 1 8に進み、上体姿勢角速度を、現在時刻 $k$ が時刻 $T_{s2}$ 以前  
ならば時刻 $T_{s2}$ までに、そうでないならば時刻 $T_e$ までに、初期値(現  
在時刻 $k$ が時刻 $T_{s2}$ 以前ならば時刻 $T_s$ での値、そうでないならば時刻  
 $T_{s2}$ での値)に戻すための上体姿勢角加速度を発生させる床反力モー  
15 ントのZMP換算値(以降、上体姿勢復元モーメントZMP換算値と呼  
び、ZMP<sub>rec</sub>と略す)のパターンを設定する。

これについて以下に詳細に説明する。現在時刻 $k$ が時刻 $T_{m2}$ 以降の  
時期の処理は、時刻 $T_{s2}$ 以前の時期の処理と同様なので、現在時刻 $k$   
が時刻 $T_{s2}$ 以前までの時期の処理だけを解説する。

時刻 $T_m$ から時刻 $T_{s2}$ までに、上体回転モードを用いて上体姿勢角  
20 加速度を発生させることにより、上体姿勢角速度を初期値(時刻 $T_s$   
での値)に戻すことを考える。このための上体姿勢角加速度パターンを、  
 $\beta(k)$ とする。

上体回転モードでは、上体姿勢角加速度 $\beta(k)$ を発生させようとする  
と、床反力モーメント $\beta(k) \cdot \Delta M_r$ が発生する。この結果、その瞬間  
25 における床反力鉛直成分が $F_z(k)$ であるとする、(目標ZMPでな  
く)運動から算出されるZMP( $k$ )は、次式で求められる $\Delta ZMP$ だけ

ずれる。

$$\Delta ZMP(k) = -\beta(k) * \Delta M_r / F_z(k) \quad \cdots \text{式 c 2 3}$$

- 5       したがって、 $\Delta M_r$ のパターンと $F_z(k)$ のパターンが決まっていれば  
       (既知であれば)、 $\Delta ZMP(k)$ のパターンを適当に設定することによ  
       って、式 c 2 3 を満足する上体姿勢角加速度パターンを発生させて、上  
       体姿勢角速度を初期値 (時刻  $T_s$  での値)、すなわち基準上体姿勢軌道  
       の初期 (時刻  $T_s$ ) 状態における上体姿勢角速度に戻すことができる。
- 10       前記上体姿勢復元モーメント  $ZMP$  換算値 ( $ZMP_{rec}$ ) は、そのよ  
       うに適切に設定された  $\Delta ZMP(k)$  を意味する。前記式 c 2 3 を用いて  
       上体姿勢復元モーメント  $ZMP$  換算値を設定する際に、 $\Delta M_r$  は厳密に  
       は変動するが、近似的に一定値としても良い。定常歩容は仮に生成され  
       るだけであり、実際のロボットをこの歩容に追従させるわけではないの  
       で、定常歩容の動力学的精度はあまり高くなくても良いからである。

- 図 2 7 に  $ZMP_{rec}$  の一例を示す。図 2 7 では、そのパターンは台形  
       パターンとされている。その台形部の折れ点の時刻は、時刻  $T_m$  と時刻  
        $T_{s2}$  との間の期間における目標  $ZMP$  パターンの折れ点の時刻 (図 1 9  
       参照) に一致させてある。これは、後述するが、今回歩容の目標  $ZMP$   
       20       パターンの修正が簡単になるからである。式 c 2 3 の  $\Delta ZMP(k)$  に  $Z$   
        $M P_{rec}$  を代入することにより次式が得られる。

$$\beta(k) = -ZMP_{rec} * F_z(k) / \Delta M_r \quad \cdots \text{式 c 2 4}$$

- 25       したがって、この式 c 2 4 で求められる  $\beta(k)$  は、図 2 8 の実線で示す  
       ようになる。なお、図 2 8 の点線で示すものは、時刻  $T_s$  から時刻  $T_m$

までの上体姿勢角加速度（図26の実線示のもの）である。

ところで、定常歩容では、時刻  $T_{s2}$  での上体姿勢角速度が時刻  $T_s$  での上体姿勢角速度に一致していることが望ましい。一致していると、上体姿勢角の変動が小さくなるからである。

- 5      そこで、時刻  $T_{s2}$  での上体姿勢角速度を時刻  $T_s$  での上体姿勢角速度に一致させるため、時刻  $T_s$  から  $T_{s2}$  までの上体姿勢角加速度  $\beta$  の積分値が0になるように、上体姿勢角加速度パターンを設定する。すなわち、時刻  $T_m$  から時刻  $T_{s2}$  までの期間の  $\beta(k)$  の積分値（図28の実線部の積分値）が、時刻  $T_s$  から時刻  $T_m$  までの上体姿勢角加速度（これは図  
10   23のS504～S516で前述のように求められる）の積分値（図28の点線部の積分値、言い換えれば時刻  $T_m$  における上体姿勢角速度と時刻  $T_s$  における上体姿勢角速度の差）に  $-1$  を乗じた値になるように設定される。

- より具体的には、本実施形態では、図27のZMP<sub>rec</sub>の台形パターンにおいて、台形の折れ点の時刻（これは前述のように定常歩容の目標ZMP軌道に基づいて決定される）を既知とし、台形高さを未知数とすることで、上記関係を満足するZMP<sub>rec</sub>の台形高さ（ZMP<sub>rec</sub>パターンを規定するパラメータ）が求められる。  
15

- 第1巡回歩容におけるZMP<sub>rec</sub>の台形高さを第1巡回歩容上体姿勢復元モーメントZMP換算値台形高さ  $acyc1$  と呼ぶ。第2巡回歩容におけるZMP<sub>rec</sub>の台形高さを第2巡回歩容上体姿勢復元モーメントZMP換算値台形高さ  $acyc2$  と呼ぶ。なお、第2巡回歩容におけるZMP<sub>rec</sub>は、時刻  $T_{m2}$  から  $T_e$  までの期間で設定される台形パターンである。  
20

- 25      補足すると、今回歩容を1歩生成している途中で歩容パラメータが変更されない限り、時刻  $T_m$  と  $T_{s2}$  との間の期間、又は時刻  $T_{m2}$  と  $T_e$

との間の期間において S 5 1 8 で決定される Z M P<sub>rec</sub> パターンは変わらない（同一パラメータ値が算出される）ので、S 5 1 8 の処理は、時刻 T<sub>m</sub> と時刻 T<sub>m2</sub> でのみ実行しても良い。

次いで S 5 2 0 に進み、時刻 k における上体姿勢復元モーメント Z M P 換算値 Z M P<sub>rec</sub> の瞬間値（今回値）が、上記のごとく決定したパラメータ（台形高さ）を基に算出される。

次いで S 5 2 2 に進み、前記式 c 2 4 を用いて、時刻 k における上記上体姿勢角加速度パターンの瞬間値（今回値） $\beta$  が算出される。

次いで S 5 2 4 に進み、ロボットの前回瞬時目標歩容状態（時刻 k - 1 の目標歩容状態）から、仮に上体回転モードをさせずに上体並進モードの運動のみをさせた場合に、今回（時刻 k）の目標 Z M P を満足するために必要な上体水平加速度  $\alpha_{tmp}$  が、ロボット 1 の動力学モデルを用いて求められる。この算出は、S 5 0 4 と同様に行なわれる。

次いで S 5 2 6 に進み、次式を用いて、上体並進モードの上体水平加速度  $\alpha$  が算出される。

$$\alpha = \alpha_{tmp} - (\Delta M_r / \Delta M_p) * \beta \quad \dots \text{式 c 2 5}$$

さらに S 5 2 8 に進み、上体水平加速度が上記の如く求めた  $\alpha$  である場合の時刻 k における床反力水平成分 F<sub>x</sub> が、前記式 c 1 7 と同様の次式 c 2 6 によって求められる。

$$F_x = m_b * \alpha + m_{sup} * d^2 X_{sup} / dt^2 + m_{swg} * d^2 X_{swg} / dt^2 \quad \dots \text{式 c 2 6}$$

補足すると、より動力学演算の精度を高めようとするならば、上記の



ごとく上体角加速度  $\beta$  を求めた後、S 5 2 6 において、式 c 2 5 を用いた上体水平加速度  $\alpha$  の算出を実行する代わりに、S 5 1 6 の補足で解説した手法と同様、上体並進モードと上記求めた上体角加速度  $\beta$  の上体回転モードを合成した運動が目標 ZMP を満足するように、上体並進モードの上体水平加速度  $\alpha$  を、より厳密な動力学モデルを用いて、解析的あるいは探索的に決定した方が良い。

以上が、時刻  $k$  が時刻  $T_s$  から  $T_m$  の間または時刻  $T_{s2}$  から  $T_{m2}$  の間のいずれでもない場合の処理である。

以上の処理を時刻  $T_{s2}$  まで完了した時の、床反力水平成分  $F_x$  を図 2 9 に示す。さらに、以上の処理を時刻  $T_e$  まで完了した時の、床反力水平成分  $F_x$  を図 3 0 に、上体姿勢角加速度  $\beta$  を図 3 1 に示す。なお、以上に示した S 4 1 2 の処理（上体水平加速度と上体姿勢角加速度を決定するサブルーチン）は、時刻  $k$  における上体水平加速度と上体姿勢角加速度の瞬間値が決定されるのであって、時刻  $T_e$  までのこれらの時系列が一度に生成されるわけではない。

なお、本実施形態では、基準上体姿勢が鉛直姿勢で、基準上体姿勢による上体姿勢角加速度が 0 であるため、上記の如く求めた上体回転モードの角加速度  $\beta$  を S 4 1 2 の処理で決定される上体姿勢角加速度とした。但し、基準上体姿勢が変化するように該基準上体姿勢軌道パラメータを設定した場合には、上記の如く求めた上体回転モードの角加速度  $\beta$  と基準上体姿勢角加速度の和をもって、S 4 1 2 の処理で決定される上体姿勢角加速度とすべきである。

時刻  $T_s$ 、 $T_m$ 、 $T_{s2}$  および  $T_{m2}$  を前記のごとく設定した理由は、時刻  $T_m$  から  $T_{s2}$  までの期間と時刻  $T_{m2}$  から  $T_e$  までの期間とにおいて、上体姿勢角速度を基準上体姿勢軌道の初期角速度に戻すように上体姿勢角加速度  $\beta$  を発生させても、床反力水平成分  $F_x$  が許容範囲  $[F_{xmin},$

F<sub>xmax</sub>]を越えないようにするためである。換言すれば、時刻 T<sub>m</sub> から T<sub>s2</sub> までの期間と時刻 T<sub>m2</sub> から T<sub>e</sub> までの期間とにおいては、床反力水平成分許容範囲が十分に大きいため、目標 ZMP を満足しつつ、上体姿勢角速度を戻すように上体姿勢角加速度  $\beta$  を発生させても、床反力水平成分 F<sub>x</sub> は、許容範囲を越えることがない。

また、時刻 T<sub>s</sub> での上体姿勢角速度を時刻 T<sub>s</sub> での上体姿勢角速度に一致させることを考えず、acyc1 と acyc2 を同一値として (acyc1 = acyc2 として)、時刻 T<sub>e</sub> での上体姿勢角速度と時刻 T<sub>s</sub> での上体姿勢角速度に一致させるように acyc1 および acyc2 の値を決定しても良い。

次いで図 22 の S414 に進み、S412 で求めた上体水平加速度を逐次積分する (時刻 T<sub>s</sub> から現在時刻 k まで累積加算する) ことにより上体水平速度が求められ、さらにその上体水平速度を逐次積分する (時刻 T<sub>s</sub> から現在時刻 k まで累積加算する) ことにより、上体水平位置 (今回値) が求められる。また、S412 で求めた上体姿勢角加速度を逐次積分する (時刻 T<sub>s</sub> から現在時刻 k まで累積加算する) ことにより上体姿勢角速度が求められ、さらにその上体姿勢角速度を逐次積分する (時刻 T<sub>s</sub> から現在時刻 k まで累積加算する) ことにより、上体姿勢角 (今回値) が求められる。

以上のごとく図 21 の S306 の定常歩容瞬時値決定サブルーチンが実行された後、S308 に進み、歩容生成用時刻 k の値が歩容生成インターバル  $\Delta k$  だけ増加される。次いで S304 に戻り、S304 に示す条件が成立している限り、S306 と S308 の処理が繰り返され、S304 に示す条件が成立しなくなったら、すなわち終端 (時刻 T<sub>e</sub> = T<sub>s</sub> + T<sub>cyc</sub>) まで仮定常歩容の生成が完了したら、S310 に進む。S310 では、次式に従って初期 (時刻 T<sub>s</sub>) 上体姿勢角と初期 (時刻 T<sub>s</sub>) 上体姿勢角速度が、上記求めた仮歩容の終端 (時刻 T<sub>e</sub>) 上体姿勢

角などを基に修正される。この修正は、上体姿勢角及びその角速度に関する定常歩容の境界条件（定常歩容の初期と終端とで上体姿勢角及び角速度を一致させる）を満たすようにするためのものである。尚、ここでの説明では、ロボット 1 の歩容は、該ロボット 1 を直線的に移動させる歩容であるとする。

この場合、次式の新たな値が修正された値である。。

新たな初期上体姿勢角速度

= 仮歩容の初期上体姿勢角速度

$$10 \quad - (\text{仮歩容の終端上体姿勢角} - \text{仮歩容の初期上体姿勢角}) / T_{cyc} \quad \dots \text{式 c 3 0}$$

新たな初期上体姿勢角 = 初期（時刻  $T_s$ ）基準上体姿勢角

$\dots \text{式 c 3 1}$

15

ここで、上記式 c 3 0 により初期状態姿勢角速度を修正する理由を以下に説明する。定常歩容では、それを繰り返したときに境界でロボット 1 の運動状態が不連続にならないように（前記境界条件を満たすように）初期状態姿勢角及びその角速度を決定する必要がある。この場合、

20 上述のように求めた仮定常歩容の終端上体姿勢角速度は、前述した上体姿勢復元モーメント Z M P 換算値 Z M P<sub>rec</sub> に対応する上体姿勢角加速度パターンの設定によって、初期上体姿勢角速度初期値（基準上体姿勢角速度初期値）に一致するように生成されているので、残りの条件である次式を満たせば、上体姿勢角及び角速度に関する上記条件を満足する。

25

$$\text{終端上体姿勢角} = \text{初期上体姿勢角} \quad \dots \text{式 c 3 2}$$

また、

上体姿勢角の 2 階微分 = 上体姿勢角加速度 …式 c 3 3

5 であるから、この式 c 3 3 の両辺を定常歩容の初期から終端まで 2 階積分することにより、次式の関係を得る。

終端上体姿勢角 = 初期上体姿勢角

+ 初期上体姿勢角速度 \* Tcyc

+ 上体姿勢角加速度の 2 階積分値

10

…式 c 3 4

一方、定常歩容生成においては、前記の如く目標 ZMP を満足するために、基本的には上体並進運動モードを用いて上体 2 4 の水平加速度（水平加減速）を調整するが、目標 ZMP を満足するための上体 2 4 の  
15 水平加速度が、十分に発生できない状況（十分な摩擦力が発生できない状況）では、上体回転運動モードを用いて全体重心加速度が変わらないようにしつつ上体姿勢角の角加速度を調整することで、上体並進運動モードによる上体水平加速度の不足分が補われる。

上記上体回転運動モードを用いて上体姿勢角加速度を調整する動作は、  
20 図 1 1 に示すフライホイール FH が備わったロボット 1 において、そのフライホイール FH の角加速度を調整することと近似的に等価である。フライホイール FH の回転速度が 0 に近いならば、ジャイロ効果は発生せず、フライホイール FH が発生する力は、フライホイール FH の角加速度だけで決定される。したがって、上体 2 4 にフライホイール FH が  
25 備わったロボット 1 においては、フライホイール FH の初期角度・角速度が多少変わっても、該フライホイール FH を同じパターンの角加速度

で動かせば、発生する力はほとんど変わらない。それ故、ロボット動力  
学方程式である式 a 8、式 a 9、式 a 10 ではジャイロ効果を見無視して  
いる。したがって、本実施形態のロボット 1 において、式 a 8、式 a 9、  
式 a 10、あるいは、より一般的で厳密な動力学モデルのいずれを用い  
た場合でも、全体重心加速度が変わらないようにしつつ上体姿勢角を同  
じパターンの角加速度で動かせば（すなわち上体回転運動モードを用い  
て、上体姿勢角を同じパターンの角加速度で動かせば）、初期上体姿勢  
角度・角速度を少々変えても、発生する慣性力と重力との合力はほぼ同  
じになる。言い換えれば、初期上体姿勢角度・角速度を少々変えても、  
上記のフローチャートに従って生成される歩容の上体姿勢角加速度は同  
じになる。

つまり、式 c 3 4 における上体姿勢角加速度の 2 階積分値は、初期上  
体姿勢角度・角速度に依存しなくなる。すなわち、式 c 3 4 における上  
体姿勢角加速度の 2 階積分値は、初期上体姿勢角度・角速度の値に関わ  
らず、一定値として扱うことができる。

初期上体姿勢角の値が仮歩容の初期上体姿勢角、かつ初期上体姿勢角  
速度の値が仮歩容の初期上体姿勢角速度であった場合に、終端上体姿勢  
角が仮歩容の終端上体姿勢角になったのであるから、この関係を式 c 3  
4 に代入して次式を得る。

仮歩容の終端上体姿勢角 = 仮歩容の初期上体姿勢角

+ 上体姿勢角加速度の 2 階積分値

+ 仮歩容の初期上体姿勢角速度 \* Tcyc

…式 c 3 5

これより、

上体姿勢角加速度の2階積分値

= (仮歩容の終端上体姿勢角 - 仮歩容の初期上体姿勢角)

- 仮歩容の初期上体姿勢角速度 \* Tcyc

…式 c 3 6

5

上記議論により上体姿勢角加速度の2階積分値は定数扱いできる（初期上体姿勢角度・角速度に依存しない）ので、上式を式 c 3 4 に代入し、次式が得られる。

10 終端上体姿勢角 = 初期上体姿勢角

+ (仮歩容の終端上体姿勢角 - 仮歩容の初期上体  
姿勢角)

- 仮歩容の初期上体姿勢角速度 \* Tcyc

+ 初期上体姿勢角速度 \* Tcyc

15

…式 c 3 7

式 c 3 7 と式 c 3 2 とから前記式 c 3 0 が得られる。

20 なお、初期上体姿勢角は、本実施形態では、式 c 3 1 のように基準上体姿勢角初期値に一致させるようにしたが、定常歩容の上体姿勢角の平均値が基準上体姿勢角初期値に一致するように初期上体姿勢角を設定するようにしてもよい。あるいは、定常歩容の上体姿勢角の最大値と最小値の平均値が基準上体姿勢角初期値に一致するように初期上体姿勢角を設定しても良い。

25 また、前記ではロボット1を直進移動させる場合に限定した例を説明したが、旋回移動を含む定常歩容を決定する場合には、その初期と終端とではロボット1の進行方向が変わる。このため初期上体姿勢角速度は

初期上体姿勢角に依存するようになる。したがって、これを考慮して初期上体姿勢角および角速度を決定する必要がある。この場合には、例えば次の式 c 3 7 a、c 3 7 b を満たすように初期上体姿勢角及び初期上体姿勢角速度を更新するようにすればよい。

5

終端上体姿勢角－初期上体姿勢角

＝床反力水平成分許容範囲を満たすように決定された上体姿勢角加速  
度の 2 階積分

＋ Z M P rec によって発生する上体姿勢角加速度の 2 階積分

10      ＋初期上体姿勢角速度 \* 定常歩容の周期

……式 c 3 7 a

終端上体姿勢角速度－初期上体姿勢角速度

＝床反力水平成分許容範囲を満たすように決定された上体姿勢角加速  
15      度の 1 階積分

＋ Z M P rec によって発生する上体姿勢角加速度の 1 階積分

…… c 式 3 7 b

20      なお、式 c 3 7 a、c 3 7 b のそれぞれの右辺第 1 項の積分期間は、  
時刻 Ts から Tm までの期間と、Ts2 から Tm2 までの期間とを合わせた  
期間であり、右辺第 2 項の積分期間は、時刻 Tm から Ts2 までの期間  
と Tm2 から Te までの期間とを合わせた期間である。

25      より具体的に説明すると定常歩容では、第 1 巡回歩容の支持脚座標系  
（次回歩容支持客座標系）から見た初期状態姿勢角及び角速度が、それ  
ぞれ、次の第 1 巡回歩容の支持脚座標系（次回歩容支持脚座標系）から  
見た終端上体姿勢角および角速度に一致していなければならない。そこ

で、本実施形態では、新たな初期上体姿勢角は、前記式 c 3 1 により決定し、この新たな初期上体姿勢角と、これを定常歩容におけるロボット 1 のトータルの旋回角（鉛直軸回りの旋回角）に応じたマトリクス（回転座標変換のマトリクス）により次次次回支持脚座標系から見た値に座標変換したものとをそれぞれ式 c 3 7 a の左辺の初期上体姿勢角、終端上体姿勢角に代入する。また、式 c 3 7 a, c 3 7 b のそれぞれの右辺第 1 項の積分に係る上体姿勢角加速度は、前記図 2 3 の S 5 1 6 で逐次求められたものが用いられる。

そして、式 c 3 7 a, c 3 7 b の初期上体姿勢角速度と、式 c 3 7 a, c 3 7 b の右辺第 2 項の積分に係る Z M P rec（図 2 7 の台形状のパターン）の台形高さをと未知数として（但し、Z M P rec の台形パターンの折れ点の時刻はあらかじめ定める。また、第 1 旋回歩容の Z M P rec の台形高さ acyc1 と第 2 旋回歩容の Z M P rec の台形高さ acyc2 を同一値とする。）、それらの未知数を含む式 c 3 7 a, c 3 7 b の連立方程式を解くことにより求められる初期上体姿勢角速度を新たな初期上体姿勢角速度として決定する。この場合、式 c 3 7 b の終端上体姿勢角速度は、未知数である初期上体姿勢角速度を、定常歩容の上記トータルの旋回角に応じたマトリクスにより次回支持脚座標系から見た値に座標変換したものである。

ロボット 1 の移動が旋回を含む移動である場合には、上記のようにして、新たな初期上体姿勢角および角速度を決定すればよい。

なお、定常歩容の境界条件を満たすような初期上体姿勢角速度を探索的に求めることも可能である。

図 2 1 の S 3 1 0 の処理を完了した後、図 2 0 の S 2 1 0 に進み、生成した歩容（仮定常歩容）の終端上体水平位置・速度を、その瞬間の支持脚に対応する支持脚座標系（図 3 2 の X''' , Y''' , Z''' 座標系）から



見た値に変換し、その値を ( $X_e$ ,  $V_{xe}$ ) とする ( $X_e$  : 終端上体水平位置、 $V_{xe}$  : 終端上体水平速度)。

次いで S 2 1 2 に進み、図示の如く、初期上体水平位置速度 ( $X_s$ ,  $V_{xs}$ ) と終端上体水平位置速度 ( $X_e$ ,  $V_{xe}$ ) との差を算出する。

- 5 この差 ( $X_s - X_e$ ,  $V_{xs} - V_{xe}$ ) を上体水平位置速度境界条件誤差 ( $errx$ ,  $errvx$ ) と呼ぶ。定常歩容では、前記境界条件を満たす必要があるので、( $X_s$ ,  $V_{xs}$ ) と ( $X_e$ ,  $V_{xe}$ ) とが一致していなければならない。従って、上体水平位置速度境界条件誤差 ( $errx$ ,  $errvx$ ) が零またはほぼ零でなければならない。本実施形態では、以下
- 10 のように、上体水平位置速度境界条件誤差 ( $errx$ ,  $errvx$ ) がほぼ零となる ( $X_s$ ,  $V_{xs}$ ) が探索的に求められる。

- 次いで S 2 1 4 に進み、算出した上体水平位置速度境界条件誤差 ( $errx$ ,  $errvx$ ) が、あらかじめ適宜設定された許容範囲内にあるか否かが判断される。尚、このように上体水平位置速度境界条件誤差の許容
- 15 範囲を設定する代わりに、初期発散成分 ( $X_s + V_{xs} / \omega_0$ ) と終端発散成分 ( $X_e + V_{xe} / \omega_0$ ) との差、および初期収束成分 ( $X_s - V_{xs} / \omega_0$ ) と終端収束成分 ( $X_e - V_{xe} / \omega_0$ ) との差がそれぞれある許容範囲内にあるか否か判断するようにしても良い。ただし  $\omega_0$  は、前述したように、ある所定の値である。

- 20 S 2 1 4 の判断結果が NO であるときには S 2 1 6 に進む。この S 2 1 6 では、( $X_s$ ,  $V_{xs}$ ) の付近に複数 (本実施形態では 2 つ) の初期値候補 ( $X_s + \Delta X_s$ ,  $V_{xs}$ ), ( $X_s$ ,  $V_{xs} + \Delta V_{xs}$ ) が決定される。ここで、 $\Delta X_s$ ,  $\Delta V_{xs}$  は、それぞれ  $X_s$ ,  $V_{xs}$  に対する所定の微小変化量を意味している。そして、これらの初期値候補のそれ
- 25 ぞれを上体水平位置速度の初期状態として、前記 S 2 0 8 と同様の処理によって定常歩容が歩容パラメータを用いて生成される。さらに、その

生成された定常歩容の終端上体位置速度を、その瞬間の支持脚に対応する支持脚座標系（図32の $X'''$ ,  $Y'''$ ,  $Z'''$ 座標系）から見た値に変換した値（ $X_e + \Delta X_{e1}$ ,  $V_{xe} + \Delta V_{xe1}$ ）,（ $X_e + \Delta X_{e2}$ ,  $V_{xe} + \Delta V_{xe2}$ ）が求められる。ここで、（ $X_e + \Delta X_{e1}$ ,  $V_{xe} + \Delta V_{xe1}$ ）は（ $X_s + \Delta X_s$ ,  $V_{xs}$ ）に対応する終端上体位置速度を意味し、（ $X_e + \Delta X_{e2}$ ,  $V_{xe} + \Delta V_{xe2}$ ）は（ $X_s$ ,  $V_{xs} + \Delta V_{xs}$ ）に対応する終端上体位置速度を意味している。なお、この場合の定常歩容（仮歩容）の生成処理では、上体水平位置速度以外の変数の初期状態（時刻 $T_s$ での状態）は、例えば上体水平位置速度の初期値候補を（ $X_s$ ,  $V_{xs}$ ）とした場合と同一に設定すればよい。S216ではさらに、前記S210と同様の処理によって、各初期値候補とこれに対応する終端上体位置速度との差、すなわち、各初期値候補（ $X_s + \Delta X_s$ ,  $V_{xs}$ ）,（ $X_s$ ,  $V_{xs} + \Delta V_{xs}$ ）のそれぞれに対応する上体水平位置速度境界条件誤差が求められる。

次いでS218に進み、（ $X_s$ ,  $V_{xs}$ ）およびその付近の初期値候補（ $X_s + \Delta X_s$ ,  $V_{xs}$ ）,（ $X_s$ ,  $V_{xs} + \Delta V_{xs}$ ）のそれぞれに対する上体水平位置速度境界条件誤差を基に、（ $X_s$ ,  $V_{xs}$ ）の次の初期値候補が探索法（擬似ヤコビアン（感度マトリックス）を求め、最急降下法などにより次候補を決定する方法や、シンプレックス法など）により決定される。すなわち、（ $X_s$ ,  $V_{xs}$ ）およびその付近の初期値候補（ $X_s + \Delta X_s$ ,  $V_{xs}$ ）,（ $X_s$ ,  $V_{xs} + \Delta V_{xs}$ ）のそれぞれに対する上体水平位置速度境界条件誤差によって、上体水平位置及び上体水平速度をそれぞれ初期値候補（ $X_s$ ,  $V_{xs}$ ）から微小変化させたときの、上体水平位置速度境界条件誤差の変化度合いを示す感度マトリックスが求められ、その感度マトリックスに基づいて、上体水平位置速度境界条件誤差をより小さくするような初期値候補（ $X_s$ ,  $V_{xs}$ ）

が新たに決定される。そして、このように上体水平位置速度の新たな初期値候補 ( $X_s$ ,  $V_{xs}$ ) が決定された後、S 206に戻る。

S 214の判断結果がNOとなる限りは上記した処理 (S 206 ~ S 218の処理) が繰り返される。なお、この場合、上体水平位置速度の新たな初期値候補 ( $X_s$ ,  $V_{xs}$ ) に対応する定常歩容の生成処理 (S 208) におけるS 300 (図21参照) では、上体姿勢角速度の初期値は、基準上体姿勢角速度の初期値ではなく、上体水平位置速度の前回の初期値候補 ( $X_s$ ,  $V_{xs}$ ) に対応するS 208の処理におけるS 310 (図20参照) で決定したものに設定される。そして、S 214の判断結果がYESになると、繰り返しループ (S 204) を抜けてS 220に進む。なお、S 204の繰り返しループを抜けたときの直前に生成された仮定常歩容が、境界条件を満たす定常歩容として得られることとなる。

S 220では、本来の初期時刻0 (今回歩容の終端時刻) における初期上体水平位置速度 ( $X_0$ ,  $V_0$ ) と初期時刻0における初期上体鉛直位置速度 ( $Z_0$ ,  $V_{z0}$ ) と初期時刻0における初期上体姿勢角および角速度が求められる。

具体的には、( $X_0$ ,  $V_0$ ) と ( $Z_0$ ,  $V_{z0}$ ) は、前記図22に示した定常歩容瞬時値決定サブルーチンのS 408およびS 414において、第2旋回歩容から第2旋回歩容に切り換わった瞬間の時刻、すなわち、時刻  $k = T_{cyc}$  (時刻  $T_e - T_s$ ) であるときに決定された上体水平位置速度と上体鉛直位置速度とを、それぞれ時刻  $T_{cyc}$  から始まる一步 (すなわち2度目の第1旋回歩容) の支持脚に対応する支持脚座標系 (図32の  $X'''$ ,  $Y'''$ ,  $Z'''$ 座標系) から見た値に変換した値に決定される。同様に、初期状態姿勢角および角速度は、時刻  $k = T_{cyc}$  (時刻  $T_e - T_s$ ) であるときに決定された上体姿勢角及び角加速度を、時刻  $T_{cyc}$  から始ま

1 1 0

る一步（すなわち 2 度目の第 1 旋回歩容）の支持脚に対応する支持脚座標系（図 3 2 の  $X'''$ ,  $Y'''$ ,  $Z'''$  座標系）から見た値に変換した値に決定される。

次いで S 2 2 2 に進み、定常歩容初期発散成分  $q [0]$  が次式から求  
5 められる。

$$q [0] = X 0 + V 0 / \omega 0 \quad \cdots \text{式 4 0}$$

ただし  $\omega 0$  は、発散についての解説で述べたように、ある所定の値であ  
10 る。

さらに、S 2 2 4 に進み、定常歩容初期発散成分  $q [0]$  が今回歩容支持脚座標系から見た値に変換され、これが  $q'' [0]$  として求められる。また、初期上体鉛直位置速度（ $Z 0$ ,  $V z 0$ ）が今回歩容支持脚座標系から見た値に変換され、これが（ $Z 0''$ ,  $V z 0''$ ）として求められ  
15 る。

補足すると、（ $Z 0''$ ,  $V z 0''$ ）は、第 2 旋回歩容の支持脚座標系（図 1 6 の  $X''$ ,  $Y''$ ,  $Z''$  座標系）から見た第 2 旋回歩容終端上体鉛直位置速度に一致している。また、 $q'' [0]$  も第 2 旋回歩容の支持脚座標系（図 1 5 の  $X''$ ,  $Y''$ ,  $Z''$  座標系）から見た第 2 旋回歩容終端発散  
20 成分に一致している。したがって、これらの性質を用いて、（ $Z 0''$ ,  $V z 0''$ ）および  $q'' [0]$  を算出するようにしても良い。

以上により、図 1 3 の S 0 2 4 の処理、すなわち定常歩容の初期状態を求めるサブルーチン処理が終了する。

次いで、図 1 3 の S 0 2 6 に進み、今回歩容の歩容パラメータを決定  
25 （一部は仮決定）する。S 0 2 6 では、より具体的には、図 3 3 に示すフローチャートに従って、以下の処理が行われる。

まず、S 6 0 0において、今回歩容の足平位置姿勢軌道が定常歩容の足平位置姿勢軌道につながるように、今回歩容の足平軌道パラメータが設定される。

具体的には、今回歩容初期遊脚足平位置姿勢（今回歩容遊脚足平位置  
5 姿勢の初期値）は、今回歩容支持脚座標系から見た現在遊脚位置姿勢（前回歩容終端遊脚位置姿勢）に設定される。今回歩容初期支持脚足平位置姿勢（今回歩容支持脚足平位置姿勢の初期値）は、今回歩容支持脚座標系から見た現在支持脚足平位置姿勢（前回歩容終端支持脚足平位置姿勢）に設定される。また、今回歩容終端遊脚足平位置姿勢は、今回歩  
10 容支持脚座標系から見た次回歩容支持脚座標系（今回歩容に係わる1歩目の遊脚着床位置姿勢の要求値）に対応して決定される。すなわち、今回歩容終端遊脚足平位置姿勢から遊脚足平22を床に接触させたまま、すべらないように該足平22をその底面のほぼ全面が接地するまで回転させたときの、該足平22の代表点が今回歩容支持脚座標系から見た次  
15 回歩容支持脚座標系の原点に合致するように今回歩容終端遊脚足平位置姿勢が決定される。

今回歩容終端では、支持脚足平22は離床して空中にある。支持脚足平22が離床してから後の軌道を決定するために、支持脚足平着地予定位置姿勢を設定する。支持脚足平着地予定位置姿勢は、今回歩容支持脚  
20 座標から見た次次回歩容支持脚座標（今回歩容に係わる2歩目の遊脚足平位置姿勢の要求値）に対応して設定される。より具体的には、支持脚足平着地予定位置姿勢は、その位置姿勢から、足平22を床に接触させたまま、すべらないように該足平22をその底面のほぼ全面が床に接地するまで回転させたときの該足平22の代表点が今回歩容支持脚座標か  
25 ら見た次次回歩容支持脚座標の原点に合致するように設定される。

今回歩容終端支持脚足平位置姿勢は、現在支持脚位置姿勢（今回歩容

初期支持脚足平位置姿勢）から、次回歩容支持脚座標系に対応する足平着地予定位置姿勢（前記要求パラメータにおける２歩目の遊脚側足平着地位置姿勢の要求値）に至る足平位置姿勢軌道を、今回歩容終端まで前記有限時間整定フィルタにより生成することにより求められる。

- 5      次いで、S 6 0 2に進み、今回歩容の基準上体姿勢軌道パラメータが、定常歩容の第１旋回歩容や第２旋回歩容と同様に決定される。ただし、今回歩容の基準上体姿勢軌道が前記定常歩容の基準上体姿勢軌道に連続してつながる（今回歩容終端での基準上体姿勢角及び角速度がそれぞれ定常歩容初期の基準上体姿勢角及び角速度に一致する）ように上記パラメータが設定される。なお、本実施形態では、基準上体姿勢は、今回歩容及び定常歩容のいずれでも定常的な鉛直姿勢である。
- 10

- 次いで、S 6 0 4に進み、今回歩容の腕姿勢軌道パラメータが、定常歩容の第１旋回歩容や第２旋回歩容と同様に決定される。ただし、今回歩容の腕姿勢軌道が前記定常歩容の腕姿勢軌道に連続してつながるように上記パラメータを設定する。なお、ここで決定される腕姿勢軌道パラメータは、定常歩容パラメータの決定（図１５のS 1 0 4）の場合と同様、鉛直軸（あるいは上体体幹軸）まわりの両腕体の角運動量変化に関すること以外の運動パラメータであり、両腕体の重心位置の軌道を規定するパラメータである。
- 15

- 20      次いで、S 6 0 6に進み、今回歩容の床反力鉛直成分軌道パラメータが、定常歩容の第１旋回歩容や第２旋回歩容と同様、該パラメータにより規定される床反力鉛直成分軌道が前記図６のように実質的に連続な（値がステップ状に飛ばない）軌道になるように設定される。

- ただし、床反力鉛直成分軌道パラメータは、今回歩容の全体重心鉛直位置速度と床反力鉛直成分軌道とのいずれもが、前記定常歩容と連続してつながるように決定される。
- 25

具体的には、まず、前記図 1 3 の S 0 2 4 の処理（定常歩容初期状態の決定処理）で最終的に求めた定常歩容の初期上体鉛直位置速度を今回歩容支持脚座標系から見た値に変換した値（ $Z_0''$ ,  $V_{z0}''$ ）、すなわち、図 2 0 の S 2 2 4 で求めた（ $Z_0''$ ,  $V_{z0}''$ ）等を基に、例えば前  
5 記式 b 1 1（あるいはロボット 1 のキネマティクスモデル）を用いて、今回歩容支持脚座標系から見た定常歩容の初期全体重心鉛直位置速度が求められる。具体的には、今回歩容支持脚座標系から見た定常歩容の初期全体重心鉛直位置は、S 2 2 4 で求めた定常歩容の上体鉛直位置  $Z_0''$  に対応する図 1 1 の単純化モデルの上体質点鉛直位置と、定常歩  
10 容初期の各足平位置を今回歩容支持脚座標系から見た値に変換したもののに対応する支持脚側及び遊脚側の脚体質点鉛直位置とを式 b 1 1 に代入することで求められる。また、今回歩容支持脚座標系から見た定常歩容の初期全体重心鉛直速度は、S 2 2 4 で求めた定常歩容の上体鉛直速度  $V_{z0}''$  に対応する図 1 1 の単純化モデルの上体質点鉛直速度と、定常歩  
15 容初期の各足平鉛直速度を今回歩容支持脚座標系から見た値に変換したもののに対応する支持脚側及び遊脚側の脚体質点鉛直速度とを式 b 1 1 の両辺を微分してなる式に代入することにより求められる。なお、この初期全体重心鉛直位置速度の算出は、より厳密なモデルを用いて行なうようにしてもよい。

20 そして、このようにして求めた定常歩容の初期全体重心鉛直位置速度を、前記式 c 1 3 と下記式 c 4 1 の終端全体重心鉛直位置速度に代入すると共に、前回の目標歩容瞬時値（より厳密には、前回目標歩容の終端状態を今回支持脚座標系に変換したもの）の全体重心鉛直位置および速度を、前記式 c 1 3 と下記式 c 4 1 の初期全体重心鉛直位置および速度  
25 に代入し、式 c 1 3 と式 c 4 1 の関係を満足するように、今回歩容の床反力鉛直成分パターン（より具体的にはパラメータ値）が決定される。

ただし、式 c 1 3 と式 c 4 1 における積分値は今回歩容の初期から終端までの期間の積分値とする。

終端全体重心鉛直速度－初期全体重心鉛直速度

- 5    = (床反力鉛直成分/ロボットの質量) の 1 階積分  
      + 重力加速度の 1 階積分

…式 c 4 1

ただし、重力加速度は負の値とする。

- 10    より具体的には、まず、図 6 のような床反力鉛直成分パターンを規定する床反力鉛直成分パラメータ（折れ点の時刻等）のうちの、少なくとも 2 つのパラメータを独立な未知変数として、その未知変数の値を、式 c 1 3 と式 c 4 1 とからなる連立方程式を解いて決定する。

- 15    未知変数とする床反力鉛直成分パラメータには、例えば、図 6 の台形の高さ（床反力鉛直成分のピーク値）と幅（片脚支持期時間）とを選択すれば良い。この場合、図 6 の台形の両側部分の傾きは今回歩容周期等に応じてあらかじめ定めた値とし、あるいは、片脚支持期から空中期に移行する時刻を除く床反力鉛直成分パターンの折れ点の時刻を今回歩容周期等に応じてあらかじめ定めた値とする。補足すると、未知変数を 1  
 20    つとすると、一般的には式 c 1 3 と式 c 4 1 の連立方程式を満足する解が存在しない。

- 次いで、S 6 0 8 に進み、単純化モデル歩容用の床反力水平成分許容範囲 [Fxmin, Fxmax]（具体的には該床反力水平成分許容範囲のパターンを規定するパラメータ）が、定常歩容の第 1 旋回歩容や第 2 旋回歩容  
 25    と同様に設定される。たとえば図 3 4 に示すようなパターンで床反力水平成分許容範囲が設定される。本実施形態では、先に S 6 0 6 で決定し



た床反力鉛直成分パターンに応じて前記式 c 1 2 に基づいて床反力水平成分許容範囲が設定される。尚、ここで設定する単純化モデル歩容用の床反力水平成分許容範囲は、先に定常歩容生成の際に設定した床反力水平成分許容範囲と同様、摩擦力限界を超えるような範囲に設定してもよい。これは、後述するフルモデル補正によって、床反力水平成分は歩容補正用の床反力水平成分許容範囲によって制限されることとなるからである。

次いで、S 6 1 0 に進み、今回歩容の Z M P 軌道（具体的には Z M P 軌道を規定するパラメータで、軌道の折れ点の時刻や位置）が、定常歩容の第 1 旋回歩容や第 2 旋回歩容と同様、安定余裕が高くかつ急激な変化をしないように、前記図 7 に示すごとく設定される。ただし、今回歩容の Z M P 軌道が前記定常歩容の Z M P 軌道に連続してつながるように上記パラメータを設定される。つまり、今回歩容終端における Z M P の位置が定常歩容初期の Z M P 位置に一致するように、Z M P 軌道パラメータが決定される。この場合、走行歩容では、片脚支持期における Z M P 軌道の折れ点の時刻や位置の設定の仕方は、前述した定常歩容の Z M P 軌道パラメータの設定の仕方と同様でよい。そして、空中期における目標 Z M P 軌道が、空中期開始時から、定常歩容初期の Z M P 位置まで、直線的に連続して変化するように Z M P 軌道パラメータを設定すればよい。

なお、S 6 1 0 で決定される今回歩容の Z M P 軌道パラメータは、仮決定されただけであり、後述するように修正される。そこで、上記のごとく設定した今回歩容の Z M P 軌道を、以降、今回歩容の仮目標 Z M P 軌道と呼ぶこととする。

最後に、S 6 1 2 に進み、上体姿勢角復元期間  $[T_a, T_b]$  が設定される。上体姿勢角復元開始時刻  $T_a$  は、定常歩容の第 2 旋回歩容における

$T_m$  に相当し、上体姿勢角復元修了時刻  $T_b$  は、定常歩容の第 2 巡回歩容における  $T_{s2}$  に相当するものである。これらの時刻  $T_a$ 、 $T_b$  の設定の仕方は、それぞれ  $T_m$  および  $T_{s2}$  の設定の仕方と同様である。

図 13 の説明に戻って、上記のごとく S 026 に示す処理（今回歩容  
5 の歩容パラメータ決定処理）を行って後、次いで S 028 に進み、今回歩容の歩容パラメータ（ZMP 軌道パラメータ）が修正される。この処理では、上体位置姿勢軌道を定常歩容に連続させ、もしくは近づけるべく ZMP 軌道パラメータが修正される。

図 35 はその処理を示すサブルーチン・フロー・チャートである。

10 まず S 700 を経て S 702 に進み、仮目標 ZMP パターンとその他の今回歩容パラメータを基に、今回歩容終端時刻までの仮今回歩容が仮生成される。

S 702 では、図 36 に示すフローチャートに従って、以下の処理が行われる。

15 以下説明すると、S 800 において、諸々の初期化が行われる。具体的には、仮歩容生成用時刻  $k$  に 0 が代入される。また、前回目標歩容の終端状態（より具体的には、上体水平位置速度、上体鉛直位置速度、上体姿勢角及びその角速度、目標足平位置姿勢、目標腕姿勢などの歩容状態の終端値）を今回支持脚座標系に変換したものを、今回歩容初期状  
20 態とする。

次いで、S 802 を経て S 804 において、仮歩容生成用時刻  $k$  が今回歩容終端時刻  $T_{curr}$  以前であるか否か（ $k \leq T_{curr}$  であるか否か）が判断され、その判断結果が YES ある場合には、S 806 の今回歩容瞬時値決定サブルーチンに進み、今回歩容の時刻  $k$  の瞬時値が決定  
25 される。次いで S 808 に進み、仮歩容生成用時刻  $k$  が  $\Delta k$  だけ増加され、S 804 に戻る。

S 8 0 4 の判断結果が N O である場合には、図 3 6 に示すフローチャートの処理が完了する。

以上の処理により、仮の今回歩容が初期から終端まで生成される。

5 S 8 0 6 の歩容瞬時値決定サブルーチンでは、図 3 7 に示す処理が行われる。以下にこれを説明する。

まず S 9 0 0 において、今回歩容パラメータの床反力鉛直成分軌道パラメータを基に、図 6 に示した目標床反力鉛直成分の時刻  $k$  における値（今回値）が求められる。次いで、S 9 0 2 において、今回歩容パラメータの Z M P 軌道パラメータを基に、図 7 に示す目標 Z M P 軌道（仮  
10 目標 Z M P 軌道）の時刻  $k$  における値（今回値）を求める。

次いで S 9 0 4 に進み、今回歩容パラメータ（足平軌道パラメータ、基準上体姿勢軌道パラメータおよび腕姿勢軌道パラメータ）を基に、時刻  $k$  における目標両足平位置姿勢、基準上体姿勢および目標腕姿勢の値（今回値）がそれぞれ求められる。ただし、目標腕姿勢に関しては、  
15 腕全体重心位置は決定されるが、鉛直軸（または上体体幹軸）まわりの角運動量を変化させる運動自由度は、未だ決定されていない。なお、定常歩容の場合と同様、今回歩容の目標足平位置姿勢軌道及び床反力鉛直成分軌道は、それぞれ、図 3 3 のフローチャートで決定した足平軌道パラメータ、床反力鉛直成分軌道パラメータに応じて互いに独立的に決定  
20 される。

次いで S 9 0 6 に進み、S 9 0 0 で求めた目標床反力鉛直成分の今回値を満足する（ロボット 1 の鉛直方向の慣性力と重力との和を目標床反力鉛直成分に釣り合わせる）ような時刻  $k$  における全体重心鉛直位置が算出される。この算出は、具体的には前記図 2 2 の S 4 0 6 と同様の  
25 処理により行なわれる。

次いで S 9 0 8 に進み、上記の如く求めた全体重心鉛直位置を満足す

る上体鉛直位置の今回値が算出される。この算出は、具体的には、前記図 2 2 の S 4 0 8 と同様の処理により行なわれる。

次いで S 9 1 0 に進み、前記図 3 3 の S 6 0 8 で決定した床反力水平成分許容範囲のパラメータに基づいて、図 3 4 に示す床反力水平成分許  
5 容範囲  $[F_{xmin}, F_{xmax}]$  の時刻  $k$  における値（今回値）が求められる。

次いで S 9 1 2 に進み、目標 Z M P を満足する（目標 Z M P 回りに発生するモーメント水平成分が 0 になる）ように、今回仮歩容の上体水平加速度と上体姿勢角加速度が決定される。ただし、これらの加速度は、床反力水平成分  $F_x$  が  $[F_{xmin}, F_{xmax}]$  を越えないように決定される。

10 この処理は、図 2 2 の S 4 1 2 の詳細を示す図 2 3 のフローチャートの処理とは若干異なる。

S 9 1 2 では、具体的には、図 3 8 のフローチャートに示す処理が行われる。図 3 8 のフローチャートでは、まず S 1 0 0 0 おいて、時刻  $k$  が前記図 3 3 の S 6 1 2 で設定した上体姿勢角復元期間  $[Ta, Tb]$  にあ  
15 るか否かが判断される。

この判断結果が N O である場合（床反力水平成分許容範囲が 0 もしくは狭い場合）には、S 1 0 0 2 から S 1 0 1 4 までの処理が実行される。S 1 0 0 2 から S 1 0 1 4 までの処理は、前述の図 2 3 の S 5 0 4 から S 5 1 6 までの処理と同じであるので、説明を省略する。

20 S 1 0 0 0 の判断結果が Y E S である場合には、S 1 0 1 6 に進み、上体姿勢復元モーメント Z M P 換算値パターン  $ZMP_{rec}$  が設定される。この場合、定常歩容の生成に係わる前記図 2 3 の S 5 1 8 と異なり、 $ZMP_{rec}$  は、一定値 0 のパターン（すなわち図 2 7 に示す台形パターンの高さが 0 であるパターン）に設定される。次に、S 1 0 1 8 から S 1  
25 0 2 6 までの処理が行われる。S 1 0 1 8 から S 1 0 2 6 までの処理は、前記図 2 3 の S 5 2 0 から S 5 2 8 までの処理と同じであるので説明を

省略する。なお、S 1 0 1 6 ~ S 1 0 2 6 の処理では、上体姿勢復元モーメント Z M P 換算値 Z M P <sub>rec</sub> の瞬時値は常に 0 になるので、S 1 0 2 0 で求められる上体回転モードの上体姿勢角加速度  $\beta$  も 0 になる。従って、 $\beta = 0$  として、S 1 0 2 2、S 1 0 2 4 及び S 1 0 2 6 の処理のみを行なうようにしてもよい。S 1 0 0 0 の判断結果が Y E S である場合、すなわち、上体姿勢角復元期間 [Ta, Tb] では、上記のように  $\beta = 0$  となることから、S 9 1 2 の処理では、上体姿勢角復元期間 [Ta, Tb] 以外の期間（床反力水平成分許容範囲が十分に大きい期間）で、定常歩容生成の場合と異なり、上体姿勢角速度の復元方向への上体姿勢変化の運動軌道は生成されないこととなる。

なお、本実施形態では、基準上体姿勢が鉛直姿勢で、基準上体姿勢による上体姿勢角加速度が 0 であるため、上記の如く求めた上体回転モードの角加速度  $\beta$  を S 9 1 2 の処理で決定される上体姿勢角加速度とした。但し、基準上体姿勢が変化するように該基準上体姿勢軌道パラメータを設定した場合には、上記の如く求めた上体回転モードの角加速度  $\beta$  と基準上体姿勢角加速度の和をもって、S 9 1 2 の処理で決定される上体姿勢角加速度とすべきである。

以上のごとく図 3 7 の S 9 1 2 の処理を完了した後、次いで S 9 1 4 に進み、上記 S 9 1 2 で求めた上体水平加速度を逐次積分する（今回歩容初期（時刻  $k=0$ ）から現在時刻  $k$  まで累積加算する）ことによって上体水平速度が求められ、さらにその上体水平速度を逐次積分する（今回歩容初期（時刻  $k=0$ ）から現在時刻  $k$  まで累積加算する）ことによって、上体水平位置（今回値）が求められる。また、上記 S 9 1 2 で求めた上体姿勢角加速度を逐次積分する（今回歩容初期（時刻  $k=0$ ）から現在時刻  $k$  まで累積加算する）ことによって、上体姿勢角速度が求められ、さらにその上体姿勢角速度を逐次積分する（今回歩容初期（時刻  $k=0$ ）か

ら現在時刻  $k$  まで累積加算する) ことによって、上体姿勢角の今回値が求められる。この S 9 1 4 の処理は図 2 2 の S 4 1 4 と同様の処理である。

以上のごとく図 3 6 の S 8 0 6 の今回歩容瞬時値決定サブルーチンが  
5 実行され、次いで S 8 0 8 に進み、歩容生成用時刻  $k$  の値が歩容生成  
インターバル  $\Delta k$  だけ増加される。次いで S 8 0 4 に戻り、S 8 0 4 に  
示す条件が成立している限り、S 8 0 6 と S 8 0 8 の処理が繰り返され  
る。そして、S 8 0 4 に示す条件が成立しなくなったら、すなわち終端  
まで仮今回歩容の生成が完了したら、図 3 5 の S 7 0 4 に進む。

10 S 7 0 4 では、上記のごとく S 7 0 2 で求めた今回歩容終端での上体  
水平位置速度 ( $X_e$ ,  $V_{xe}$ ) から、終端発散成分  $q_0[k]$  ( $k=T_{curr}$ )  
が図示の式 (前記式 1 0) を用いて求められる。

次いで S 7 0 6 に進み、今回歩容終端発散成分  $q_0[k]$  と定常歩容初期  
発散成分  $q''$  (図 2 0 の S 2 2 4 で求めたもの) との差である終端発散  
15 成分誤差  $err_q$  が図示の式を用いて求められる。さらに、S 7 0 8 に進  
んで、その求めた終端発散成分誤差  $err_q$  が許容範囲内 (0 近傍の範  
囲) にあるか否か判断する。

S 7 0 8 の判断結果が NO であるときは S 7 1 0 に進み、 $a = \Delta a$   
( $\Delta a$  は所定の微小量) とし、図 3 9 の関係に従って現在の仮目標 Z M  
20 P パターンに台形状の修正を加えた目標 Z M P を基に、前記 S 7 0 2 と  
同様に、終端までの仮今回歩容を計算する。ここで、図 3 9 を参照して、  
 $a$  は、今回歩容終端発散成分を定常歩容初期発散成分にできるだけ一致  
させる (今回歩容の上体水平位置姿勢軌道を定常歩容の上体水平位置姿  
勢軌道に近づける) ために、仮目標 Z M P を修正するための台形パター  
25 ンの高さである。この場合、本実施形態では、仮目標 Z M P の修正は、  
支持脚足平 2 2 の底面のほぼ全面が接地する期間 (足底全面接地期間)、

すなわち、床反力水平成分許容範囲が十分に広いものとなる期間において行なうようにしており、上記台形パターンの折れ点の時刻は、足底全面接地期間における仮目標 Z M P の折れ点の時刻に合わせて設定されている。なお、S 7 1 0 で  $a = \Delta a$  とするのは、現在の仮目標 Z M P 軌道  
5 を上記台形パターンによって微小量、修正したときの前記終端発散成分誤差  $errq$  の変化を観測するためである。

上記のように S 7 1 0 にて、 $a = \Delta a$  として仮目標 Z M P 軌道を修正したときの仮今回歩容を終端まで生成した後、さらに S 7 1 2 に進み、S 7 1 0 で求めた仮今回歩容終端での上体水平位置速度 ( $X_{e1}$ ,  $V_{x_{e1}}$ ) を基に、この仮今回歩容における終端発散成分  $q1[k]$  が図示の式  
10 ( $前記式 c 1 0$ ) を用いて求められる。

尚、S 7 1 0 において  $\Delta a$  は、本実施形態では、適宜に設定される微小量の定数としたが、以下に説明する繰り返し演算によって終端発散成分誤差  $errq$  が小さくなるにつれて  $\Delta a$  を減少させるように該  $\Delta a$  を設  
15 定するようにしても良い。ただし、定数にしておいても、数回の繰り返し演算で終端発散成分誤差  $errq$  を許容範囲内に収めることができる。

次いで S 7 1 4 に進み、パラメータ感度  $r$  ( $\Delta a$  に対する終端発散成分誤差の変化の割合) が図示の式から求められる。さらに、S 7 1 6 に進み、 $a = -errq / r$ 、すなわち S 7 0 6 で求めた終端発散成分誤差  
20  $errq$  を、S 7 1 4 で求めたパラメータ感度  $r$  で割った値を高さ  $a$  とする台形パターンの修正量を図 3 9 の関係に従って仮目標 Z M P パターンに加えることにより、仮目標 Z M P パターンが修正される (新たな仮目標 Z M P パターンが決定される)。

次いで S 7 0 2 に戻る。そして、S 7 0 8 の判断結果が N O である限りは、上記した S 7 0 2 ~ S 7 1 6 の処理が繰り返され、S 7 0 8 の判断結果が Y E S になったときには、その繰り返しループ (S 7 0 0) を  
25

抜けて S 7 1 8 に進む。

S 7 1 8 では、仮今回歩容の終端上体姿勢角と定常歩容の初期上体姿勢角との差、および仮今回歩容の終端上体姿勢角速度と定常歩容の初期上体姿勢角速度との差などを基に、今回歩容の上体姿勢角が定常歩容の上体姿勢角に近づくように、今回歩容の上体姿勢復元モーメント Z M P 換算値 (Z M P rec) のパターンが決定される。ここで決定する Z M P rec は、後述する今回歩容瞬時値の生成処理で、床反力水平成分許容範囲が十分に大きいものとなる期間 (片脚支持期内の期間) において、上体姿勢角軌道を定常歩容につながらせる (近づける) ように上体姿勢角  
5 加速度を発生させても、今回歩容終端発散成分と定常歩容初期発散成分との一致性 (S 7 0 8 の条件) を維持できるように、仮目標 Z M P を修正するためのものである。

この Z M P rec は、前記定常歩容生成処理で説明したものと同様に台形状のパターンであり、具体的には次のように決定される。すなわち、  
15 図 2 7 に示した Z M P rec の台形パターンにおいて、台形の頂点 (折れ点) の時刻は既知とする (より具体的には台形の折れ点の時刻を目標 Z M P の折れ点時刻に合わせる) と共に、台形高さを未知数とし、以下のように Z M P rec の台形高さ (パラメータ) が求められる。ただし、S 7 1 8 では図 2 7 における Tm および Ts2 をそれぞれ Ta, Tb に置き換  
20 えるものとする。

上記のように上体姿勢復元モーメント Z M P 換算値パターンの未知パラメータがひとつの場合には、今回歩容の終端において上体姿勢角と上体姿勢角速度の両方を定常歩容に連続につなげることは一般的にはできない。そこで、本実施形態では、複数歩に渡って徐々に、生成される歩容の状態が定常歩容の状態に近づけるように、未知パラメータを決定することとする。



補足すると、1歩容の中でのZMP<sub>rec</sub>パターンを複雑にし、未知パラメータを2つ以上にして、今回歩容の終端において上体姿勢角と上体姿勢角速度との両者を定常歩容に連続につなげて良いが、ZMP<sub>rec</sub>パターンがジグザグに大きく変動し過ぎる恐れがある。

5       以下では、算出原理を説明した後、算出手順を説明する。

前述のごとくS 7 0 2でZMP<sub>rec</sub>パターンの台形高さを0として求めた仮今回歩容の終端上体姿勢角と定常歩容の初期上体姿勢角との差を求め、これを $\theta_{err}$ とする。また、仮今回歩容の終端上体姿勢角速度と定常歩容の初期上体姿勢角速度との差を求め、これを $v\theta_{err}$ とする。

10       ここで、ZMP<sub>rec</sub>パターンの台形高さをある値 $b_{curr}$ として今回歩容が生成され、引き続いて、今回歩容と同様のアルゴリズムによって第1巡回歩容が生成されると想定する。ただし、第1巡回歩容の上体姿勢復元モーメントZMP換算値ZMP<sub>rec</sub>パターンは、図23のS 5 1 8において求められた第1巡回歩容のZMP<sub>rec</sub>パターン（高さが前記  
15        $acyc1$ である図27の台形パターン）とある値 $b1$ の和であるとする。

このようにして生成された歩容をZMP<sub>rec</sub>修正歩容と呼び、その終端（第1巡回歩容の終端）上体姿勢角と角速度をそれぞれ $\theta 1$ 、 $v\theta 1$ とする。

S 0 2 4における定常歩容の初期状態を求めるサブルーチンの処理が  
20       完了した時点で求められた本来の定常歩容（最終的にS 3 1 0の式c 3 0、式c 3 1によって決定された定常歩容初期上体姿勢角および角速度を初期値とし、ZMP<sub>rec</sub>パターンをS 5 1 8において求められたパターン（高さが $acyc1$ である図27の台形パターン）とした場合の定常歩容）の第1巡回歩容終端上体姿勢角と角速度をそれぞれ $\theta 1_{org}$ 、 $v\theta$   
25        $1_{org}$ とする。

ここで、 $\Delta\theta 1$ 、 $\Delta v\theta 1$ を次のように定義する。

$$\Delta \theta 1 = \theta 1 - \theta 1 \text{org} \quad \cdots \text{式 c 5 0}$$

$$\Delta v \theta 1 = v \theta 1 - v \theta 1 \text{org} \quad \cdots \text{式 c 5 1}$$

$\Delta \theta 1$  および  $\Delta v \theta 1$  は、Z M P rec 修正歩容と本来の定常歩容を第 1  
5 旋回歩容の終端まで生成した時点において、両者間における上体姿勢角  
の差及び角速度の差を意味する。もし、 $\Delta \theta 1$  および  $\Delta v \theta$  が 0 になれば、Z M P rec 修正歩容に引き続いて、今回歩容と同様のアルゴリズム  
によって、Z M P rec パターンの台形高さを前記 acyc2 として第 2 旋回  
歩容が生成されると、この歩容は、本来の定常歩容に一致する。

10 したがって、 $\Delta \theta 1$  および  $\Delta v \theta 1$  が 0 となる今回歩容台形高さ bcurr、  
第 1 旋回歩容台形高さ b1 を求め、求めた bcurr を今回歩容の台形高さ  
として最終的に決定すれば良い。

ところで、ロボット 1 の上体姿勢角に関する動力学モデルが図 1 1 に  
示すフライホイール FH のような線形特性を持つことから、 $\Delta \theta 1$  およ  
15 び  $\Delta v \theta$  は、今回歩容台形高さ bcurr、第 1 旋回歩容台形高さ b1、仮今  
回歩容の終端上体姿勢角と定常歩容の初期上体姿勢角の差  $\theta \text{err}$ 、仮今  
回歩容の終端上体姿勢角と定常歩容の初期上体姿勢角速度の差  $v \theta \text{err}$   
と以下の関係を持つ。

$$20 \quad \Delta \theta 1 = c11 * bcurr + c12 * b1 + \theta \text{err} + e1 * v \theta \text{err} \quad \cdots \text{c 式 5 2}$$

$$\Delta v \theta 1 = c21 * bcurr + c22 * b1 + e2 * v \theta \text{err} \quad \cdots \text{c 式 5 3}$$

ただし、c11、c12、c21、c22、e1、e2 は、今回歩容、第 1 旋回歩容の  
歩容周期、上体姿勢復元モーメント Z M P 換算値 Z M P rec パターンの  
25 パラメータ（特に時間に関するパラメータ）などによって一義的に決定  
される係数である。

以上の原理に基づき、算出手順として、まず、仮今回歩容と定常歩容との境界での上体姿勢角の差  $\theta_{err}$  と角速度の差  $V \theta_{err}$  が求められる。

次いで、式 c 5 2, c 5 3 の係数である c11, c12, c21, c22, e1, e2 が、今回歩容、第 1 旋回歩容の歩容周期、上体姿勢復元モーメント Z M P 換算値 Z M P rec パターンのパラメータ（特に時間に関するパラメータ）などを基に求められる。

次いで c 式 5 2, 式 c 5 3 の右辺が 0 となるように今回歩容台形高さ bcurr、第 1 旋回歩容台形高さ b1 が決定される。すなわち、式 c 5 2, 式 c 5 3 の右辺を 0 とした連立方程式を解くことによって、bcurr, b1 が求められる。

最後に、今回歩容の上体姿勢復元モーメント Z M P 換算値 (Z M P rec) の台形パターンの台形高さが、上記求めた今回歩容台形高さ bcurr に設定される。

次いで S 7 2 0 に進み、現在の仮目標 Z M P パターン (S 7 0 0 の繰り返しループを抜けたときの仮目標 Z M P パターン) に、S 7 1 8 で上記のように求めた上体姿勢復元モーメント Z M P 換算値パターンを加算してなるパターンが今回歩容の目標 Z M P パターンとして決定される。なお、この処理は、S 7 1 0 において  $\Delta a$  の高さの台形パターンを仮目標 Z M P パターンに加える処理と同様である。

以下に仮目標 Z M P パターンに上体姿勢復元モーメント Z M P 換算値パターンを加算した理由を述べる。

S 7 0 0 のループにおいて生成される仮今回歩容は、前述の如く、上体姿勢復元モーメント Z M P 換算値 Z M P rec を 0 (Z M P rec の台形パターンの高さパラメータを 0) にして生成される。このようにして S 7 0 0 のループで最終的に生成された仮今回歩容では、その上体位置速度は、定常歩容に連続し、もしくは近づくが、上体姿勢角は、定常歩容

の上体姿勢角からずれ、場合によっては発散してしまう。

S 7 1 8 で求められた上体姿勢復元モーメント Z M P 換算値パターンは、上体姿勢角の定常歩容に対するずれを 0 に近づけるための上体姿勢角加速度を発生させるものである。

- 5       しかし、S 7 0 0 のループで最終的に得られた仮目標 Z M P パターンを修正することなく、S 7 1 8 で求められた上体姿勢復元モーメント Z M P 換算値パターンに応じた上体姿勢角加速度を発生させると、動力学的平衡条件（ロボットの重力と慣性力の合力が目標 Z M P に作用するモーメントが鉛直成分を除いて 0 になること）を満足させるために、上体  
10   水平位置軌道を前記仮今回歩容の上体水平位置軌道からずらさざるを得なくなる。そこで、本実施例では、上体水平位置軌道を S 7 0 0 のループで最終的に得られるものからずらさなくて済むように、Z M P <sub>rec</sub> によって仮目標 Z M P パターンを修正することとした。

- 前記仮今回歩容の運動に加えて、S 7 1 8 で求めた上体姿勢復元モー  
15   メント Z M P 換算値パターンに対応する上体姿勢角加速度を発生させると、Z M P（運動によって発生する重力と慣性力の合力の鉛直成分を除くモーメントが 0 になる点）は上体姿勢復元モーメント Z M P 換算値だけずれる。したがって、逆に、仮目標 Z M P パターンに上体姿勢復元モーメント Z M P 換算値パターンを加算したパターンを目標 Z M P パター  
20   ンとして、S 7 1 8 で求めた上体姿勢復元モーメント Z M P 換算値パターンに対応する上体回転モードの上体姿勢角加速度を発生させながら、目標 Z M P パターンを満足する今回歩容を生成すれば、前記仮今回歩容と同じ上体並進運動となる。

- 以上が、仮目標 Z M P パターンに上体姿勢復元モーメント Z M P 換算  
25   値パターンを加算したパターンを目標 Z M P パターンとした理由である。

図 1 3 に戻って、上記のごとく S 0 2 8 において今回歩容パラメータ

を修正した後、S 0 3 0に進み、歩容補正用の床反力水平成分許容範囲とZMP許容範囲とをそれぞれ規定するパラメータを決定する。この場合、歩容補正用の床反力水平成分許容範囲は、例えば前記単純化モデル歩容用の床反力水平成分と同様、X軸方向（前後方向）、Y軸方向（左右方向）のそれぞれについて、床反力鉛直成分軌道と、前記式c 1 2とに基づいて、前記図3 4に示すようなパターンに設定される。そして、例えば、前記式c 1 2の $k_a \cdot \mu$ の値が歩容補正用の床反力水平成分許容範囲を規定するパラメータとして設定される。但し、この床反力水平成分許容範囲は、式c 1 2の係数 $k_a$ の値を、単純化モデル歩容用の床反力水平成分許容範囲よりも小さめに設定する等して、確実に摩擦限界内の範囲に設定することが望ましい。

また、詳細は後述するが、ZMP許容範囲は、両足平位置姿勢軌道により定まる支持多角形に応じて決定される。このZMP許容範囲は、基本的には、支持多角形内の長方形の領域（XY座標平面の領域）に設定され、例えばX軸方向の両端の値とY軸方向の両端の値とがZMP許容範囲を規定するパラメータとして設定される。尚、走行歩容におけるZMP許容範囲は、片脚支持期では、支持脚足平2 2の接地面内に設定され、空中期では、XY軸両方向に幅の無い範囲（すなわち点）となる（例えば目標ZMPそのものがZMP許容範囲とされる）。

S 0 3 0の処理を実行した後、あるいはS 0 1 6の判断結果がNOである場合には、S 0 3 2に進み、今回歩容瞬時値（現在時刻tの値）が前記単純化モデルを用いて決定される。

上記S 0 3 2では、図3 7のS 9 0 0からS 9 1 0までと同一の処理が行なわれ、次に、S 9 1 2のサブルーチンである図3 8のS 1 0 0 0～S 1 0 2 6の処理が行なわれる。ただし、この場合、図3 8のS 1 0 1 6においては、上体姿勢復元モーメントZMP換算値（ZMP<sub>rec</sub>）

パターンは、0に設定されるのではなく、図35のS718で設定した上体姿勢復元モーメントZMP換算値（ZMP<sub>rec</sub>）パターンに設定される。次いで図37のS914と同一の処理が実行され、これにより、図13のS032の処理が完了する。

- 5 次いでS034に進み、スピン力をキャンセルする（ロボット1の腕以外の運動によって目標ZMP回りに発生する床反力モーメント鉛直成分を略零にする）ための腕動作が決定される。具体的には、腕を振らなかった場合の目標ZMPにおける床反力モーメント鉛直成分軌道（厳密には、腕を振らずに歩容を生成した場合において、ロボットの重力と慣性力の合力が目標ZMPに作用するモーメント鉛直成分軌道の各瞬時値の符号を反転したもの）が求められる。すなわち、S032の処理によって生成された歩容の運動（これには腕振りの運動は含まれていない）の瞬時値に釣り合う目標ZMP（瞬時値）回りの床反力モーメント鉛直成分で瞬時値が求められる。そして、これを、腕振り運動の等価慣性モーメントで割ることにより、スピン力キャンセルに必要な腕振り動作の角加速度が求められる。なお、補足すると、腕の振りが大き過ぎる場合には、等価慣性モーメントよりも大きな値で割れば良い。
- 10
- 15

- 次に、この角加速度を2階積分し、これを積分値が過大になるのを防ぐためのローカットフィルタに通して得た角度を腕振り動作角とする。
- 20
- ただし、腕振り動作では、左右の腕を前後逆方向に振り、両腕体の重心位置を変化させないようにする。なお、スピン力をキャンセルするための腕振り運動を定常歩容でも生成しておき、これにつながるように、今回歩容における腕振り運動を決定するようにしてもよい。

- 以上説明したS034までの処理によって生成された現在時刻tにおける歩容の瞬時値を、以降、単純化モデル歩容瞬時値という。本実施形態では、この単純化モデル歩容瞬時値は、単純化モデル（図11の動力
- 25

学モデル)を用いて、ロボット1にその運動によって発生する慣性力と重力との合力が目標ZMPまわりに発生する床反力モーメントが0になるように(目標ZMPに関する動力学的平衡条件を満たすように)決定される。従って、本実施形態における単純化モデル歩容は、前記b')

5 の意味での目標歩容に相当する。

この場合、単純化モデル歩容瞬時値のうちの、上体位置姿勢の瞬時値と、上体鉛直位置の瞬時値とは仮瞬時値であり、後述するフルモデル補正によって補正されるものである。また、本実施形態における単純化モデル歩容瞬時値のうち、目標ZMPまわりの床反力モーメントの瞬時値

10 は0であるが、これも、仮瞬時値であり、後述するフルモデル補正によって補正されるものである。

尚、以上説明した単純化モデル歩容瞬時値の決定処理においては、前記図5の走行歩容を例にとって説明したが、ロボット1の歩行歩容を生成する場合でも、上記と同様に、単純化モデル歩容瞬時値を決定できる。

15 この場合には、床反力鉛直成分軌道(1歩分の軌道)は、例えば図40に示すような折れ線状のパターンで設定すればよい。この例では、より詳しくは、歩行歩容用の床反力鉛直成分軌道は、両脚支持期では、床反力鉛直成分の増加側に凸(上に凸)の台形状に設定され、片脚支持期では床反力鉛直成分の減少側に凸(下に凸)の台形状に設定される。この

20 場合、床反力鉛直成分軌道の2つの台形部分の高さC1、C2等は、次のように決定することが好ましい。すなわち、本願出願人が先に提案した上体高さ決定法(特開平10-86080号公報。より具体的には同公報の図6の手法等)を用いて、ロボット1の脚体2、2の関節(具体的には膝関節)の変位に関する所定の幾何学的条件(各脚体2、2が伸び切ることが無いようにするための条件)を満たす上体鉛直位置軌道を

25 基準上体鉛直位置軌道として求めておく。そして、床反力鉛直成分軌道

を歩容初期から歩容終端まで2階積分して得られるロボット1の全体重心鉛直位置軌道に対応する上体鉛直位置軌道の形状的な特徴量（例えば最大値と最小値との差）が、上記基準上体鉛直位置軌道の特徴量（例えば最大値と最小値との差）に合致するように、床反力鉛直成分軌道の2  
5 つの台形部分の高さC1、C2を決定する。尚、この場合、走行歩容用の床反力鉛直成分軌道の設定の場合と同様、歩行歩容用の床反力鉛直成分軌道においても、その1周期内の平均値がほぼロボット1の自重に一致するようにする。

このように、歩行歩容用の床反力鉛直成分軌道を決定することで、各  
10 脚体2、2が伸び切ることが無いような適切な単純化モデル歩容瞬時値（特に上体鉛直位置の瞬時値）を決定できる。歩行歩容を生成する場合には、床反力鉛直成分軌道を上記のように設定する以外は、前述した走行歩容の場合の単純化モデル歩容瞬時値の生成処理と同様の処理を行なうことによって、歩行歩容の単純化モデル歩容瞬時値を決定すればよい。

15 なお、歩行歩容の単純化モデル歩容瞬時値は、本出願人が先に提案した特願平2000-352011号の第1実施形態等の手法によって決定するようにしてもよい。

図13のフローチャートの説明に戻って、次に、S036に進み、歩容補正用の床反力水平成分許容範囲とZMP許容範囲を規定するパラメ  
20 ータ（S030で設定したもの）を基に、歩容補正用の床反力水平成分許容範囲と、ZMP許容範囲との瞬時値（現在時刻tの値）が求められる。

次いで、S038に進み、フルモデルを用いて補正歩容の発生（歩容の補正）を行い、最終的な目標歩容の瞬時値が決定される。すなわち、  
25 前記図8を参照して説明したように、補正目標上体位置姿勢や、目標ZMPまわりの補正目標床反力モーメントの算出（決定）などが実行され



る。

この S 0 3 8 の歩容補正手法が本願発明の主たる特徴をなす。以下、この歩容補正手法について種々の例を説明するので、その歩容補正手法をここで概説する。

- 5      その歩容の補正手法を分類すると、図 4 1 に示す如く分類される。この分類表は、本願出願人が先に提案した特願 2 0 0 1 - 1 3 3 6 2 1 号の図 1 2 に示す分類表とほぼ同一になる。ただし、単純化モデルの入力を補正しない方式の内の摂動モデルを用いない手法だけは除く。なぜなら、この手法は、床反力だけを補正して動力学的平衡条件を満足させる
- 10    手法であるが、これだけでは、走行などのように床反力水平成分許容範囲と Z M P 許容範囲が狭い時がある歩容の生成において、これら許容範囲を越えないように歩容を補正することは事実上不可能であるからである。

- 第 1 実施形態に係る装置の補正手法は、フルモデルフィードフォワード補正型である。また、逆動力学フルモデル（逆フルモデル）を用いる
- 15    手法で、かつ単純化モデル歩容を補正しない手法であり、かつ摂動モデルを用いる手法である。

- 図 4 2 は、この発明の第 1 実施形態に係る歩容生成装置 1 0 0 の動作、具体的には、図 1 3 のフロー・チャートの S 0 3 8 の歩容の修正手法を
- 20    説明する機能ブロック図である。ただし、図 4 2 の単純化モデル 2 0 0 は、単に動力学モデルだけでなく、前述の S 0 1 0 から S 0 3 4 の処理、すなわち単純化モデル歩容瞬時値の算出（決定）処理を表す。したがって、図 4 2 において、単純化モデル 2 0 0 から先の部分が S 0 3 8 の処理に相当する。

- 25    尚、歩容補正用の床反力水平成分許容範囲と Z M P 許容範囲の瞬時値を決定処理は、図 1 3 のフローチャートの参照符号 S 0 3 6 を用いて示

している。

実際の処理はひとつのコンピュータで実行されるので、ブロック図を離散化した後、ブロック図の上流側から下流側（歩容出力側）に向かって順に実行される。ただし、上流側に戻るフィードバック量は、前回制御周期（現在時刻  $t$  に対して時刻  $t - \Delta t$ ）に算出した値（状態量）を用いることとする。尚、以降、前回制御周期（時刻  $t - \Delta t$ ）に算出した値を前回値と略す。

S 0 3 8 の処理が実行される毎に、ブロック図の 1 制御周期分の演算が実行される。

- 10 補足すると、離散化手法としては、後退差分、前進差分、双一次変換などが知られており、いずれを用いても構わないが、例えば、後退差分を用いると、ある変数の今回の値（出力）を算出するために、その変数の今回の値（出力）自身が必要となる場合が生じる。これは、関数  $f$  に対し、 $y = f(u, y)$  を満足する  $y$  を求める場合に、 $y$  含まない関数によって  $y$  を表せるように式の変形を行うのと同じように、入出力関係を明確にしたブロック図に変形する必要がある。このように変形したブロック図が、上流側から下流側（歩容出力側）に向かって順に実行される。

- 20 S 0 3 8 では、まず、上記のごとく得られた単純化モデル歩容の目標上体姿勢角（以降、単純化モデル上体姿勢角と呼ぶ）、目標上体水平位置（以降、単純化モデル上体水平位置と呼ぶ）、目標重心位置、目標足平位置姿勢、目標腕姿勢などの運動を表す変数（これを運動変数と呼ぶ）の瞬時値と、目標 Z M P の瞬時値とが前記逆動力学フルモデル（逆フルモデル）2 0 1 に入力される。入力された運動変数で表される運動に釣り合う（すなわち運動によってフルモデルが発生する）床反力水平成分と目標 Z M P まわりの床反力モーメントが、逆フルモデル 2 0 1 の  
25 演算処理によって算出される。なお、単純化モデル歩容における目標 Z

MP まわりの床反力モーメントは0であるので、逆フルモデル 2 0 1 によって算出される目標 Z MP まわりの床反力モーメントは、単純化モデル歩容の誤差としての意味を持つものである。なお、逆フルモデル 2 0 1 により求められた床反力水平成分と床反力モーメントをそれぞれ「フルモデル床反力水平成分」、「フルモデル床反力モーメント」と呼ぶ。また、以降、しばしば、フルモデル床反力水平成分を  $F_{full}$ 、フルモデル床反力モーメントを  $M_{full}$  と略す。

また、前記逆フルモデル 2 0 1 は、目標重心位置を満足する上体鉛直位置を算出する。さらに、図示は省略しているが、逆フルモデル 2 0 1 は、重心水平位置も算出する。

補足すると、フルモデルには目標全体重心鉛直位置を入力しており、また目標床反力鉛直成分は目標全体重心鉛直位置の2階微分値から求められるので、フルモデルには、特に目標床反力鉛直成分を入力必要はない。冗長であっても演算を減らすためなどの理由で、フルモデルに目標床反力鉛直成分を入力しても良い。

ここで、歩容補正に用いられる摂動モデルについて説明する。

摂動モデルは、上体水平位置補正用摂動モデル 2 0 2 および上体姿勢角補正用摂動モデル 2 0 3 から成る。尚、摂動モデルは、このようにふたつのモデルに分離しないで、図 1 1 のようなひとつのモデルにしても良い。

上体水平位置補正用摂動モデル 2 0 2 は、前記上体並進モードにおける床反力の摂動と上体水平位置の摂動との関係を表す。

上体水平位置補正用摂動モデル 2 0 2 は、目標床反力モーメントの補正量を入力し、これに動力学的に釣り合う目標上体水平位置の補正量を算出する。この入力（目標床反力モーメントの補正量）を、上体水平位置補正用摂動モデルモーメント  $M_p$  と呼ぶ。また、上体水平位置補正用

摂動モデル 2 0 2 の出力（目標上体水平位置の補正量）を、補正用摂動モデル上体水平位置  $X_c$  と呼ぶ。また、上体水平位置補正用摂動モデル 2 0 2 が発生する床反力水平成分を上体水平位置補正用摂動モデル床反力水平成分  $F_p$  と呼ぶ。

- 5 上体水平位置補正用摂動モデル 2 0 2 は、図 4 3 のように、支点と倒立振子質点（上体質点）とこれらを結合する伸縮自在な支持棒から成る倒立振子で表される。支点の水平位置は前記した今回歩容の支持脚座標系の原点の水平位置に一致し、支点の鉛直位置は目標 Z M P の鉛直位置に一致するように支点の位置が設定されている。倒立振子質点の質量
- 10  $m_b$  は、図 1 1 に示す前記単純化モデル（3 質点+フライホイールのモデル）の上体質点質量と同じである。倒立振子質点の鉛直位置  $Z_c$  は、単純化歩容に対応する図 1 1 に示す単純化モデルの上体質点位置の鉛直位置  $Z_b$  と同一とする。

- この上体水平位置補正用摂動モデル 2 0 2 は、前記単純化モデル（3
- 15 質点モデル）の動力学方程式の式 a 8、式 a 9、式 a 1 0 において、床反力モーメントの摂動  $\Delta M_y$  と上体質点水平位置の摂動  $\Delta X_b$  の関係を表す。

- そこで、 $M_y$ 、 $X_b$ 、 $Z_b$  以外は定数とみなして、床反力モーメントの摂動  $\Delta M_y$  と上体質点水平位置の摂動  $\Delta X_b$  の関係を式 a 1 0 から求める
- 20 と、次式が得られる。

$$\Delta M_y = -m_b \cdot \square X_b \cdot (g + d^2 Z_b / dt^2) + m_b \cdot (Z_b - Z_{zmp}) \cdot d^2 \square X_b / dt^2$$

…式 a 1 2

- 25 同様に、 $F_x$ 、 $X_b$  以外は定数とみなして、床反力水平成分の摂動  $\Delta F_x$  と上体質点水平位置の摂動  $\Delta X_b$  の関係を式 a 9 から求めると、次式が

1 3 5

得られる。

$$\Delta F_x = m_b \cdot d^2 X_b / dt^2 \quad \cdots \text{式 a 1 3}$$

- 5 上体水平加速度によって発生する  $\Delta M_p$  と  $\Delta F_p$  の比である前記上体並進モード床反力比率  $h$  は、式 a 1 2 右辺のうちの上体水平加速によって発生する項（すなわち第 2 項）と式 a 1 3 との比であるから、次式が得られる。

$$10 \quad h = (Z_b - Z_{zmp}) \quad \cdots \text{式 a 1 4}$$

すなわち、上体並進モード床反力比率  $h$  は、単純化モデルの上体質点（倒立振子質点）の支点からの高さに相当する。

よって、式 a 1 2 と式 a 1 4 より次式が得られる。

15

$$\Delta M_y = -m_b \cdot X_b \cdot (g + d^2 Z_b / dt^2) + m_b \cdot h \cdot d^2 X_b / dt^2 \quad \cdots \text{式 a 1 5}$$

- 一方、上体質点（倒立振子質点）に作用する重力と慣性力との合力の並進力鉛直成分に釣り合う床反力鉛直成分を上体床反力鉛直成分  $F_{bz}$  と呼ぶ。すなわち、上体床反力鉛直成分  $F_{bz}$  は、次式で定義される。
- 20

$$F_{bz} = m_b \cdot (g + d^2 Z_b / dt^2) \quad \cdots \text{式 a 1 6}$$

式 a 8 より、上体床反力鉛直成分  $F_{bz}$  は次式となる。

25

$$F_{bz} = F_z - m_{sup} \cdot (g + d^2 Z_{sup} / dt^2) - m_{swg} \cdot (g + d^2 Z_{swg} / dt^2)$$

…式 a 1 7

5 言い換えると、上体床反力鉛直成分は、床反力鉛直成分  $F_z$  と図 1 1 に示す前記単純化モデル（3 質点＋フライホイールのモデル）の両脚質点に作用する重力と慣性力との合力の並進力鉛直成分との和に等しい。

式 a 1 6 を式 a 1 5 に代入することにより、次式が得られる。

$$\Delta M_y = -F_{bz} \cdot \Delta X_b + m_b \cdot h \cdot d^2 \Delta X_b / dt^2$$

…式 a 1 8

10

式 a 1 8 の  $\Delta M_y$  を上体水平位置補正用摂動モデルモーメント  $M_p$ 、 $\Delta X_b$  を補正用摂動モデル上体水平位置  $X_c$  に対応させることにより（式 a 1 8 の  $\Delta M_y$  に上体水平位置補正用摂動モデルモーメント  $M_p$ 、 $\Delta X_b$  に補正用摂動モデル上体水平位置  $X_c$  を代入することにより）、次

15 式が得られる。

$$M_p = -F_{bz} \cdot X_c + m_b \cdot h \cdot d^2 X_c / dt^2$$

…式 a 1 9

すなわち、上体水平位置補正用摂動モデル 2 0 2 は、式 a 1 4 によって求められる上体並進モード床反力比率  $h$  と式 a 1 7 によって求められる上体床反力鉛直成分  $F_{bz}$  を用いて、式 a 1 9 で表される。

また、式 a 1 3 の  $\Delta F_x$  を上体水平位置補正用摂動モデル床反力水平成分  $F_p$  に対応させることにより、次式が得られる。

$$25 \quad F_p = m_b \cdot d^2 X_c / dt^2$$

…式 a 2 0

すなわち、式 a14、式 a17、式 a19、式 a20 によって上体水平位置補正用摂動モデル 202 が記述される。

補足すると、ここでは、上体質点位置の摂動と上体位置（上体代表点位置）の摂動は一致するものとみなしているが、厳密には、一致するとは限らない。従って、 $M_p$ 、 $F_p$  と  $X_c$  の関係を求めるためには、さらに上体質点水平位置と上体位置の幾何学的関係を表すモデルが必要である。

一方、上体姿勢角補正用摂動モデル 203 は、前記上体回転モードにおける床反力の摂動と上体姿勢角の摂動の関係を表す。

上体姿勢角補正用摂動モデル 203 は、床反力モーメントの補正量が入力され、これに動力学的に釣り合う目標上体姿勢角の補正量を算出する。この入力（床反力モーメントの補正量）を、上体姿勢角補正用摂動モデルモーメント  $M_r$  と呼ぶ。また、上体姿勢角補正量摂動モデル 203 の出力（目標上体姿勢角の補正量）を補正用摂動モデル上体姿勢角  $\theta_c$  と呼ぶ。また、上体姿勢角補正用摂動モデルが発生する床反力水平成分を上体水平位置補正用摂動モデル床反力水平成分  $F_r$  と呼ぶ。 $F_r$  は前述したごとく 0 である。すなわち、次式が常に成立する。

$$F_r = 0 \quad \dots \text{式 a21}$$

上体姿勢角補正用摂動モデル 203 は、図 44 のように、フライホイール FH で表される。フライホイールのイナーシャは、図 11 に示した前記単純化モデル（3 質点モデル＋フライホイール）のフライホイール FH と同じである。この上体姿勢角補正用摂動モデル 203 のフライホイールの回転角度が補正用摂動モデル上体姿勢角  $\theta_c$ 、そのフライホイールによって発生する床反力モーメントが上体姿勢角補正用摂動モデルモーメント  $M_r$  に相当する。

この上体姿勢角補正用摂動モデル 203 は、前記単純化モデル（3 質点＋フライホイールのモデル）の動力学方程式の前記式 a10 において、床反力モーメントの摂動  $\Delta M_y$  と上体姿勢角の摂動  $\Delta \theta_b$  の関係を表している。

- 5      そこで、 $M_y$ 、 $\theta_b$  以外は定数とみなして、床反力モーメントの摂動  $\Delta M_y$  と上体姿勢角の摂動  $\Delta \theta_b$  の関係を式 a10 から求めると、次式が得られる。

$$\Delta M_y = J \cdot d^2 \theta_b / dt^2 \quad \dots \text{式 a22}$$

10

式 a22 の  $\Delta M_y$  を上体姿勢角補正用摂動モデルモーメント  $M_r$ 、 $\Delta \theta_b$  を補正用摂動モデル上体姿勢角  $\theta_c$  に対応させることにより、次式が得られる。

$$15 \quad M_r = J \cdot d^2 \theta_c / dt^2 \quad \dots \text{式 a23}$$

すなわち、上体姿勢角補正用摂動モデル 203 は、式 a23 で表される。また、上体水平位置補正用摂動モデル床反力水平成分  $F_r$  は上記したごとく式 a21 のようになる（ $F_r = 0$ ）。

- 20      後述するように、S038 では、最終的に、補正歩容（より詳しくは、単純化モデル歩容の一部の瞬時値を補正した目標瞬時値）が生成（出力）される。補正歩容の目標上体姿勢角（これを以降、補正目標上体姿勢角と呼ぶ）は、前記求めた単純化モデル上体姿勢角の瞬時値（S032 で求めた今回歩容の現在時刻  $t$  での目標上体姿勢角の瞬時値）に前記  
25      補正用摂動モデル上体姿勢角  $\theta_c$ （現在時刻  $t$  の制御周期で求められる値）を演算部 204 で加えることにより得られる。補正歩容の目標上体



水平位置（これを以降、補正目標上体水平位置と呼ぶ）は、前記求めた単純化モデル上体水平位置の瞬時値（S 0 3 2 で求めた今回歩容の現在時刻  $t$  での目標上体水平位置の瞬時値）に補正用摂動モデル上体水平位置  $X_c$ （現在時刻  $t$  の制御周期で求められる値）を演算部 2 0 5 で加えることにより得られる。

補正歩容の目標床反力も修正される。具体的には、目標 Z M P まわりの床反力モーメント水平成分が 0 でなくなり、補正目標床反力モーメントが目標値として出力される。したがって、目標 Z M P は本来の意味（床反力モーメント水平成分が 0 である点という意味）を持たなくなる。

また、目標床反力水平成分も、補正目標床反力水平成分に修正され、出力される。

上記のごとく、補正歩容の運動は、単純化モデル歩容の運動に摂動モデルの運動（詳しくは上体位置姿勢補正用摂動モデルと上体姿勢角補正用摂動モデルの運動）を加えた（合成した）運動である。

一般に、ある基準運動に、ある摂動運動を加えた運動が発生する床反力は、基準運動が発生する床反力（運動によって発生する重力と慣性力に釣り合う床反力）と摂動運動によって発生する床反力の摂動分の和で近似される。

したがって、補正歩容の運動によって発生する床反力（厳密には、補正歩容の運動によって発生する床反力を、逆フルモデル 2 0 1 を用いて算出した値）は、逆フルモデル 2 0 1 の床反力（単純化モデル歩容の運動によって発生する床反力を、逆フルモデル 2 0 1 を用いて算出した値）に上体位置姿勢補正用摂動モデル 2 0 2 の入力モーメント（前記上体水平位置補正用摂動モデルモーメント  $M_p$ ）と上体姿勢角補正用摂動モデル 2 0 3 の入力モーメント（前記上体姿勢角補正用摂動モデルモーメント  $M_r$ ）とを加えたものとなる。

補正歩容が、動力学的平衡条件を精度良く満足するということは、補正歩容の運動によって発生する床反力（詳しくは補正歩容の運動によって逆フルモデル 201 上で発生する床反力）が、補正目標床反力とほぼ一致することであるから、この条件を満足するためには、以下のふたつ

5 の式を満足しなければならない。

$$\begin{aligned}
 & \text{フルモデル床反力モーメント } M_{\text{full}} \\
 & + \text{上体水平位置補正用摂動モデルモーメント } M_p \\
 & + \text{上体姿勢角補正用摂動モデルモーメント } M_r \\
 10 \quad & = \text{補正目標床反力モーメント}
 \end{aligned}$$

…式 5

$$\begin{aligned}
 & \text{フルモデル床反力水平成分 } F_{\text{full}} \\
 & + \text{上体水平位置補正用摂動モデル床反力水平成分 } F_p \\
 15 \quad & + \text{上体姿勢角補正用摂動モデル床反力水平成分 } F_r \\
 & = \text{補正目標床反力水平成分}
 \end{aligned}$$

…式 6

また、補正歩容の真の Z M P は、補正目標床反力モーメントを目標床反力鉛直成分で割った値だけ、単純化モデル歩容の目標 Z M P（理想目標 Z M P）からずれた点に変更される。

20

$$\begin{aligned}
 \text{補正歩容の真の Z M P} & = \text{目標 Z M P} \\
 & + \text{補正目標床反力モーメント / 目標床反力鉛直成分}
 \end{aligned}$$

25

…式 7

尚、補正歩容の真のZMPのX方向（前後方向）成分を算出する場合には、補正目標床反力モーメントのY軸（左右方向軸）まわり成分を用いる。また、補正歩容の真のZMPのY方向成分を算出する場合  
5 には、補正目標床反力モーメントのX軸（前後軸）まわり成分を用いる。ただし、補正歩容の真のZMPのY方向成分を算出する場合には、式7の右辺の「+」は「-」にしなければならない。

式7から求められる補正歩容の真のZMPは、ZMP許容範囲内になければならない。これをZMP制約条件と呼ぶ。

また、補正目標床反力水平成分は、歩容補正用の床反力水平成分許容  
10 範囲内になければならない。これを床反力水平成分制約条件と呼ぶ。

以上のように、補正歩容は、式5、式6、ZMP制約条件（式7から得られる補正歩容の真のZMPの存在範囲条件）および床反力水平成分制約条件を満足しなければならない。

しかし、単に、これらの式や条件を満足するだけでは、前記補正用摂  
15 動モデル上体位置と前記補正用摂動モデル上体姿勢角が発散してしまう。

そこで、前記上体水平位置補正用摂動モデル202と前記上体姿勢角補正用摂動モデル203の状態量（より具体的には、補正用摂動モデル上体水平位置速度、補正用摂動モデル上体姿勢角・角速度など）を基に、これらの状態量がある所定の状態に収束する（安定する）ように、補正  
20 用摂動モデル202、203の安定化制御を行う。

まず、上体水平位置補正用摂動モデル202の安定化制御について詳細を説明する。

先に本出願人が提案した特願2001-133621号では、倒立振り子型の摂動モデルを用い、補正歩容の瞬間姿勢を基にフルモデルを用い  
25 て計算される重心水平位置  $XGf$  を、単純化モデル歩容の瞬間姿勢を基に単純化モデルを用いて計算される重心水平位置  $XGs$  に収束させる制

御則を持ち、その制御則で決定されたフィードバック量（フィードバック操作量）を上体水平位置補正用摂動モデルに付加的に入力していた。

具体的には、式 8 で与えられる目標整定位置に収束するように式 9 の制御則が与えられていた。ただし、 $m_{total}$  は前記ロボット総重量、 $m_b$  は前記上体質点質量（倒立振子質量）であり、 $X_{Gf}$  は、単純化モデル歩容の瞬間姿勢を基にフルモデルを用いて計算される重心水平位置、すなわち、前記逆フルモデルが算出する重心水平位置である。また、 $K_p$ 、 $K_v$  はフィードバック制御のゲインである。

$$10 \quad \text{目標整定位置} = -m_{total}/m_b * (X_{Gf} - X_{Gs}) \quad \dots \text{式 8}$$

$$\begin{aligned} & \text{上体水平位置補正用摂動モデル制御用フィードバック量の ZMP 換算値} \\ & = K_p * (\text{補正用摂動モデル上体水平位置} - \text{目標整定位置}) \\ & + K_v * \text{補正用摂動モデル上体水平速度} \\ 15 \quad & + \text{補正用摂動モデル上体水平位置} \end{aligned}$$

…式 9

尚、補足すると、実際にコンピュータ上で計算を実行する時には、上記右辺の変数の値には、前回値が用いられる。以降の制御則でも同様である。

本出願人が今回提案するフルモデル補正手法に用いられる上体水平位置補正用摂動モデルは、非線形性は強いものの、前述のごとく、倒立振子型のモデルであるという点では、先に本願出願人が提案した特願 2001-133621 号に用いられる上体水平位置補正用摂動モデルと類似している。

そこで、今回提案するフルモデル補正手法でも、目標整定位置は同様

に決定し、目標整定位置に収束させるための制御則だけを変更することとする。

上体水平位置補正用摂動モデル 2 0 2 を目標整定位置に収束（安定）させるための制御則を上体水平位置補正用摂動モデル制御則 2 0 6 と呼び、この制御則が決定するフィードバック量（操作量）を上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $M_{pfdmd}$  と呼ぶ。ここで「要求値」を付けたのは、後述するように、真の Z M P が前記 Z M P 許容範囲内に存在し、かつ、床反力水平成分が床反力水平成分許容範囲内になるように、上記制御則で決定された値に制限が加えられて修正されるからである。制限が加えられて修正されたモーメントを、上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント  $M_{pf}$  と呼ぶ。

上体水平位置補正用摂動モデル制御則 2 0 6 には、式 9 の代わりに、次式を用いれば良い。

$$\begin{aligned}
 15 \quad & \text{上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント要求値 } M_{pfdmd} \\
 & = K_{pp} * (\text{補正用摂動モデル上体水平位置 } X_c - \text{目標整定位置}) \\
 & + K_{pv} * \text{補正用摂動モデル上体水平速度 } dX_c/dt \\
 & - \text{補正用摂動モデル上体水平位置 } X_c * \text{上体床反力鉛直成分 } F_{bz} \\
 & \qquad \qquad \qquad \dots \text{式 1 0}
 \end{aligned}$$

ただし、 $K_{pp}$ 、 $K_{pv}$  はフィードバック制御のゲインである。

上体水平位置補正用摂動モデル 2 0 2 の説明で述べたごとく、上体質点（倒立振子質点）には鉛直方向に上体床反力鉛直成分  $F_{bz}$  が作用している。このため、上体質点には、上体質点位置が原点（支点位置）からずれていくと、ますますずれようとするモーメントが作用する。式 1 0 の右辺第 3 項は、それを打ち消すためのモーメントである。

上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $M_{pfdmd}$  の X 軸（前後方向軸）まわり成分を求める場合には、補正用摂動モデル上体水平位置速度および目標整定位置は Y 軸方向（左右方向）成分を用いる。

- 5 上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $M_{pfdmd}$  の Y 軸（左右方向軸）まわり成分を求める場合には、補正用摂動モデル上体水平位置速度および目標整定位置は X 軸方向（前後方向）成分を用い、右辺第 3 項の「-」を「+」に代える。

尚、目標整定位置は、0（倒立振子支点の水平位置）にしても良い。

- 10 また、上体水平位置補正用摂動モデル制御則 2 0 6 は、先に本出願人が提案した特願 2 0 0 1 - 1 3 3 6 2 1 号に述べたような各種方法のいずれかにしても良い。また、それら以外でも、少なくとも上体水平位置補正用摂動モデル 2 0 2 の状態量のいずれか（より具体的には補正用摂動モデル上体水平位置速度など）を基に、この状態量がある所定の状態に  
15 収束する（安定する）ように、上体水平位置補正用摂動モデルの安定化制御則 2 0 6 を決定すれば良い。

次に、上体姿勢角補正用摂動モデル 2 0 3 の安定化制御について詳細を説明する。

- 目標瞬時値発生部 1 0 0 b が出力する基準上体姿勢角（図 3 7 の S 9  
20 0 4 で求められたもの）あるいは単純化モデルによる目標上体姿勢角（図 3 7 の S 9 1 4 で求められたもの）に、補正目標上体姿勢角、すなわち、単純化モデルによる目標上体姿勢角に補正用摂動モデル上体姿勢角を加えたものが整定あるいは追従するように、上体姿勢角補正用摂動モデル 2 0 3 の状態に応じて、P I 制御などのフィードバック制御則に  
25 よってフィードバック量（操作量）を決定し、これを上体姿勢角補正用摂動モデル 2 0 3 に付加的に入力する。

この制御則を上体姿勢角補正用摂動モデル制御則 2 0 7 と呼び、このフィードバック量（操作量）を上体姿勢角補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $Mrfdmd$  と呼ぶ。ここで「要求値」を付けたのは、上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $Mpfdmd$  と同様の理由からである。制限が加えられて修正されたモーメントを、上体姿勢角補正用摂動モデル安定化モーメント  $Mrf$  と呼ぶ。

上体姿勢角補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $Mrfdmd$  を決定する上体姿勢角補正用摂動モデル制御則 2 0 7 は、具体的には、次式のようにすれば良い。

$$\begin{aligned} & \text{上体姿勢角補正用摂動モデル安定化モーメント要求値 } Mrfdmd \\ &= K_{rp} * (\text{補正用摂動モデル上体姿勢角 } \theta_c \\ &\quad - (\text{基準上体姿勢角} - \text{単純化モデルによる目標上体姿勢角})) \\ &+ K_{rv} * \text{補正用摂動モデル上体姿勢角速度 } d\theta_c/dt \end{aligned}$$

…式 1 1

ただし、 $K_{rp}$ 、 $K_{rv}$  はフィードバック制御のゲインである。

なお、式 1 1 において、（基準上体姿勢角－単純化モデルによる目標上体姿勢角）の代わりに 0 としてもよい。

再び、図 4 2 の機能ブロック図を用いて S 0 3 8 の処理を説明すると、上記のごとく、前記上体水平位置補正用摂動モデル制御則 2 0 6 （式 1 0）によって上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $Mpfdmd$  が求められる。また、前記上体姿勢角補正用摂動モデル制御則 2 0 7 （式 1 1）によって上体姿勢角補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $Mrfdmd$  が求められる。

次いで、上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント  $Mpf$  が 0

であったと仮定した場合の上体位置補正用摂動モデルの床反力推定（算出）値  $F_0$  が  $F_0$  演算部 208 により求められる。後述するように、上体水平位置補正用摂動モデル 202 には、フルモデル床反力モーメント  $M_{full}$  に、上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント  $M_{pf}$  を加えられたものが入力される。したがって、 $F_0$  は、上体水平位置補正用摂動モデル 202 にフルモデル床反力モーメント  $M_{full}$  の符号を反転させたものだけが入力された場合に上体水平位置補正用摂動モデル 202 が発生する床反力である。

具体的には、次式によって  $F_0$  が求められる。

10

$$F_0 = m_b \cdot d^2 X_c / dt^2 - 1/h \cdot M_{pf} \quad \cdots \text{式 12}$$

右辺第 1 項は、前回（時刻  $t - \Delta t$ ）の上体水平位置補正用摂動モデル 202 の床反力水平成分を表す。

15 右辺第 2 項は、前回の上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント  $M_{pf}$  によって、上体水平位置補正用摂動モデル 202 に直接的に発生した（すなわち直達項の）床反力水平成分を表す。

すなわち、上体水平位置補正用摂動モデル 202 の前回の上体質点水平加速度に上体質点の質量  $m_b$  を乗じた値から、前回の上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント  $M_{pf}$  を上体並進モード床反力比率  $h$  で割った値を減じることによって、 $M_{pf}$  が 0 であったと仮定した場合  
20 の上体位置補正用摂動モデルの床反力  $F_0$  の推定値が求められる。

次に、前記制約（床反力水平成分正条件および ZMP 制約条件）を無視して、上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント  $M_{pf}$  を上体  
25 水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $M_{pfdmd}$  に一致させ、かつ、上体姿勢角補正用摂動モデル安定化モーメント  $M_{rf}$  を、上



体姿勢角補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $Mrfdmd$  に一致させたと仮定し場合に、目標  $ZMP$  まわりに発生する床反力モーメント  $Min$  が  $Min$  演算部 209 により求められる。この床反力モーメントを無制限時補正目標床反力モーメント  $Min$  と呼ぶ。無制限時補正目標床反力モーメント  $Min$  は、次式によって求められる。

$$Min = Mpfdmd + Mrfdmd \quad \dots \text{式 1 3}$$

すなわち、無制限時補正目標床反力モーメント  $Min$  は、上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $Mpfdmd$  に上体姿勢角補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $Mrfdmd$  を加算することにより得られる。

式 1 3 が成立することを証明する。後述するように、上体水平位置補正用摂動モデルモーメント  $Mp$  は、上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント  $Mpf$  からフルモデル床反力モーメント  $Mfull$  を減じた値と決定され、上体姿勢角補正用摂動モデルモーメント  $Mr$  は、 $Mrf$  と決定される（後述の式 2 2、式 2 3 を参照）。

したがって、式 5 によって得られる補正目標床反力モーメントは次式のようになる。

$$\text{補正目標床反力モーメント} = Mp + Mrf \quad \dots \text{式 1 4}$$

よって、式 1 4 において、上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント  $Mpf$  に上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $Mpfdmd$  を代入し、かつ、上体姿勢角補正用摂動モデル安定化モーメント  $Mrf$  に上体姿勢角補正用摂動モデル安定化モーメント要求値

Mrfdmd を代入することで、前記式 13 が得られる。

次いで、前記制約（床反力水平成分制約条件および ZMP 制約条件）を無視して、上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント  $M_{pf}$  を上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $M_{pfdmd}$  に一致させ、かつ、上体姿勢角補正用摂動モデル安定化モーメント  $M_{rf}$  を、上体姿勢角補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $M_{rfdmd}$  に一致させた場合に、発生する床反力水平成分  $F_{in}$  が  $F_{in}$  演算部 210 により求められる。この床反力水平成分を無制限時補正目標床反力水平成分  $F_{in}$  と呼ぶ。

- 10 補正目標床反力水平成分は、前記式 6 によって得られるが、前述のごとく、上体姿勢角補正用摂動モデル 203 の挙動によって上体姿勢角補正用摂動モデル 203 には床反力水平成分は発生しない、すなわち  $F_r$  は 0 である。したがって、無制限時補正目標床反力水平成分  $F_{in}$  は、上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント  $M_{pf}$  が 0 であったと  
15 仮定した場合の補正目標床反力水平成分に、上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント  $M_{pf}$  を上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $M_{pfdmd}$  に変更したことによって増加する床反力水平成分を加えたものになる。

- ところで、上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント  $M_{pf}$  を  
20 0 から上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $M_{pfdmd}$  に変更したことによって増加する床反力水平成分は、上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $M_{pfdmd}$  を上体並進モード床反力比率  $h$  で割った値になる。

- したがって、無制限時補正目標床反力水平成分  $F_{in}$  は、前記式 15  
25 に示すように、上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $M_{pfdmd}$  を上体並進モード床反力比率  $h$  で割った値に、前記求めたフ

ルモデル床反力水平成分  $F_{full}$  を加算し、さらに、上体水平位置補正用振動モデル安定化モーメント  $M_{pf}$  が 0 であったと仮定した場合の上体位置補正用振動モデルの床反力の算出値  $F_0$  を加算することによって得られる。

5

$$F_{in} = 1/h * M_{pfdmd} + F_{full} + F_0 \quad \dots \text{式 1 5}$$

次いで、後に詳説する制限手段によって、無制限時補正目標床反力モーメント  $M_{in}$  と無制限時補正目標床反力水平成分  $F_{in}$  とから、これら  
10 に制限を加えた値である（目標 ZMP まわりの）制限補正目標床反力モーメント  $M_{ltd}$  と制限補正目標床反力水平成分  $F_{ltd}$  が制限処理部 2 1 1 により決定される。後述するように、補正歩容の（ZMP まわりの）床反力モーメントは制限補正目標床反力モーメント  $M_{ltd}$  に一致し、補正歩容の床反力水平成分は制限補正目標床反力水平成分  $F_{ltd}$  に一致  
15 する（後述の式 2 6，式 2 7 の証明を参照）。

制限補正目標床反力モーメント  $M_{ltd}$  と制限補正目標床反力水平成分  $F_{ltd}$  とは、補正歩容の真の ZMP が前記 ZMP 許容範囲内に存在し、かつ、補正歩容の床反力水平成分が床反力水平成分許容範囲内になるように決定される。すなわち、 $M_{ltd}$  および  $F_{ltd}$  は ZMP 制約条件および  
20 床反力水平成分制約条件を満足するように決定される。

また、上記制約条件下で、上体水平位置補正用振動モデル安定化モーメント  $M_p$  は、可能な限り、上体水平位置補正用振動モデル安定化モーメント要求値  $M_{pfdmd}$  に一致または近い値になるように決定される。同様に、上体姿勢角補正用振動モデル安定化モーメント  $M_r$  は、可能な  
25 限り上体姿勢角補正用振動モデル安定化モーメント要求値  $M_{rfdmd}$  に一致または近い値になるように決定される。これにより、前記補正用振

動モデル上体位置  $X_c$  と前記補正用摂動モデル上体姿勢角  $\theta_c$  とを安定化し、発散することを防止する。

次いで、以下の式により、上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント  $M_{pf}$ 、および上体姿勢角補正用摂動モデル安定化モーメント  $M_{rf}$  がそれぞれ  $M_{pf}$  演算部 212、 $M_{rf}$  演算部 213 により求められる。

$$M_{pf} = (F_{ltd} - F_{full} - F_0) \cdot h \quad \cdots \text{式 20}$$

$$M_{rf} = M_{ltd} - M_{pf} \quad \cdots \text{式 21}$$

10

すなわち、 $M_{pf}$  演算部 212 では、制限補正目標床反力水平成分  $F_{ltd}$  から、フルモデル床反力水平成分  $F_{full}$  を減じ、 $M_p$  が 0 であったと仮定した場合の上体位置補正用摂動モデル 202 の床反力の算出値  $F_0$  を減じた値に、上体並進モード床反力比率  $h$  を乗じることにより、前記上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント  $M_{pf}$  が得られる。また、 $M_{rf}$  演算部 213 では、目標 ZMP まわりの制限補正目標床反力モーメント  $M_{ltd}$  から前記上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント  $M_{pf}$  を減じることにより、上体姿勢角補正用摂動モデル安定化モーメント  $M_{rf}$  が得られる。

次いで、以下の式により、上体水平位置補正用摂動モデル床反力モーメント  $M_p$ 、および上体姿勢角補正用摂動モデル床反力モーメント  $M_r$  が求められる。

$$M_p = M_{pf} - M_{full} \quad \cdots \text{式 22}$$

$$M_r = M_{rf} \quad \cdots \text{式 23}$$

25

すなわち、 $M_p$  演算部 214 にて、上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント  $M_{pf}$  からフルモデル床反力モーメント  $M_{full}$  を減じることにより、上体水平位置補正用摂動モデル床反力モーメント  $M_p$  が得られる。また、上体姿勢角補正用摂動モデル床反力モーメント  $M_r$  は、

5 上体姿勢角補正用摂動モデル安定化モーメント  $M_{rf}$  と同一の値とされる。

次いで、上体水平位置補正用摂動モデル床反力モーメント  $M_p$  が上体位置補正用摂動モデル 202 に入力され、その入力された床反力モーメントに釣り合う補正用摂動モデル上体位置  $X_c$  が算出される。

10 また、上体姿勢角補正用摂動モデル床反力モーメント  $M_r$  が上体姿勢角補正用摂動モデル 203 に入力され、その入力された床反力モーメントに釣り合う補正用摂動モデル上体姿勢角  $\theta_c$  が算出される。

次いで、演算部 205, 204 にて、それぞれ次式 24、式 25 に従って、補正目標上体水平位置と補正目標上体姿勢角とが決定され、これ

15 らがそれぞれ上体水平位置姿勢の最終的な目標瞬時値として出力される。

補正目標上体水平位置

$$= \text{単純化モデル上体水平位置} + \text{補正用摂動モデル上体位置 } X_c$$

…式 24

20

補正目標上体姿勢角

$$= \text{単純化モデル上体姿勢角} + \text{補正用摂動モデル上体姿勢角 } \theta_c$$

…式 25

25 すなわち、単純化モデル上体水平位置に補正用摂動モデル上体位置  $X_c$  を加えることにより補正目標上体水平位置が得られ、これが出力さ

れる。また、単純化モデル上体姿勢角に補正用摂動モデル上体姿勢角  $\theta_c$  を加えることにより補正目標上体姿勢角が得られ、これが出力される。

また、目標ZMPまわりの補正目標床反力モーメントとして制限補正目標床反力モーメント  $M_{ltd}$  が出力されると共に、補正目標床反力水平成分として制限補正目標床反力水平成分  $F_{ltd}$  が出力される。

すなわち、次式26、式27に従って、補正目標床反力水平成分と目標ZMPまわりの補正目標床反力モーメントとがそれぞれ、床反力水平成分および床反力モーメント（目標ZMPまわりのモーメント）の最終的な目標瞬時値として決定され、これらが出力される。

10

補正目標床反力モーメント

= 制限補正目標床反力モーメント  $M_{ltd}$

…式26

15 

補正目標床反力水平成分

= 制限補正目標床反力水平成分  $F_{ltd}$

…式27

以上のごとく、S038の歩容補正が行われる。

20 以上のように上体水平位置を補正上体水平位置に修正し、上体姿勢角を補正上体姿勢角に修正した歩容（補正歩容）に対し、動力学的平衡条件（逆フルモデル201上での動力学的平衡条件）をほぼ満足する補正目標床反力水平成分と目標ZMPまわりの補正目標床反力モーメントとが式26、式27によって求められることを、以下に証明する。

25 式20、式21、式22、式23を式5の左辺に代入することにより、動力学的平衡条件を満足するための補正目標床反力モーメントは、

Mltd となる。すなわち、式 26 によって動力学平衡条件を満足するための補正目標床反力モーメントが求められることが証明された。

一方、式 a20、式 a21、式 12、式 20 を式 6 の左辺に代入することにより、次式で展開されるごとく、動力学平衡条件を満足するための補正目標床反力水平成分は、Fltd となる。すなわち、式 27 によって動力学平衡条件を満足するための補正目標床反力水平成分が求められることが証明された。

動力学平衡条件を満足するための補正目標床反力水平成分

$$\begin{aligned}
 &= m_b \cdot d^2 X_c / dt^2 + F_{full} \\
 &= F_0 + 1/h \cdot M_{pf} + F_{full} \\
 &= F_0 + 1/h \cdot (F_{ltd} - F_{full} - F_0) \cdot h + F_{full} \\
 &= F_{ltd}
 \end{aligned}$$

…式 30

15

尚、補足すると、第 1 実施形態は、フィードフォワード型の補正であり、また、摂動動力学モデルは厳密モデルではない。このため、上記のごとく式 5 および式 6 を満足するように歩容を補正しても、厳密には、動力学平衡条件を満足するのではなく、近似的に動力学平衡条件を満足する。

20

次に、前述の制限手段の詳細、すなわち制限処理部 211 の処理の詳細を説明する。

制限手段（制限処理部 211）では、前述した機能を持たせるために、以下の処理が行われる。

25

まず、目標瞬時値発生部 100b が決定した ZMP 許容範囲の瞬時値、すなわち前記図 13 の S036 で決定された ZMP 許容範囲の瞬時値が、

目標 Z M P まわりの床反力モーメント許容範囲の瞬時値に変換される。

具体的には、次式の関係を用いて床反力モーメント許容範囲が求められる。

## 5 床反力モーメント許容範囲

$$= (ZMP \text{ 許容範囲} - \text{目標 } ZMP) * \text{床反力鉛直成分ベクトル}$$

…式 3 2

ただし、式 3 2 においては、変数はすべてベクトルである。床反力鉛直成分ベクトルは、鉛直成分以外の成分を 0 にした並進床反力ベクトルである。また、「\*」は外積を意味する。

Z M P 許容範囲は、支持多角形に応じて決定されるべきで、一般的には、複雑な形状になるが、ここでは、演算を簡素化するために、床面上の長方形の領域とする。すなわち、Z M P 許容範囲、ひいては、これを床反力モーメントに変換してなる床反力モーメント許容範囲が、前後方向（X 軸方向）成分と左右方向（Y 軸方向）成分それぞれ独立に範囲が設定される。

例えば、支持多角形と目標 Z M P が図 4 5 のような状況にある場合には、図示のごとく、Z M P 許容範囲は支持多角形に内包されるように設定される。また同時に、Z M P 許容範囲は目標 Z M P を内包するように設定される。なお、図 4 5 の例での支持多角形は、歩行歩容における両脚支持期のものであり、両端の長方形部分が各脚体 2 の足平 2 2 の接地面（床面との接触面）を表している。

歩行歩容あるいは走行歩容における片脚支持期では、支持多角形は、支持脚足平 2 2 の接地面（床面との接触面）である。この場合においては、Z M P 許容範囲は、目標 Z M P を内包しつつ、該支持多角形に内包



され、もしくは、その支持多角形とほぼ一致するように設定される。また、走行歩容の空中期では、ZMP許容範囲は、例えば目標ZMPを中心として、X軸、Y軸両方向に幅が0の領域、すなわち、目標ZMPそのものの点（これは面積が0の領域を意味する）に設定される。

- 5 歩容補正用の床反力水平成分許容範囲も、前後方向（X軸方向）成分と左右方向（Y軸方向）成分それぞれ独立に範囲が設定される。この場合、単純化モデル歩容用の床反力水平成分許容範囲と同様、X軸方向、Y軸方向の各軸方向について、例えば前記式 c 1 2 に基づいて設定される。なお、この場合、先にも述べた如く、床反力水平成分許容範囲は、
- 10 単純化モデル歩容用の許容範囲よりも狭くする等して、確実に摩擦限界内に収まるように設定することが好適である。

- ZMP制約条件と床反力水平成分制約条件とを考慮せず、動力学的平衡条件（特に、重力と慣性力の合力が目標ZMPまわりに作用するモーメントの水平成分が0であること）だけを満足する歩容の運動は、サジ
- 15 タルプレーン上での運動と、ラテラルプレーン上での運動とに分離して、それぞれを動力学的平衡条件を満足するように生成してから合成しても、動力学的平衡条件を近似的に満足することが知られている。また、以上のごとくZMP許容範囲と歩容補正用の床反力水平成分許容範囲とを設定することにより、ZMP制約条件および床反力水平成分制約条件も、
- 20 サジタルプレーン上での制約条件とラテラルプレーン上での制約条件とに分離できる。したがって、ZMP制約条件、床反力水平成分制約条件および動力学的平衡条件のすべてを考慮した歩容の運動も、サジタルプレーン上での運動と、ラテラルプレーン上での運動とに分離して運動を生成し、後に合成することができる。

- 25 そこで、以下では、理解を容易にするために、サジタルプレーン上の運動に限定して制限手段の動作を説明するが、ラテラルプレーン上での

運動に関しても同様である。

以上のように簡単化することにより、補正歩容の床反力モーメントが床反力モーメント許容範囲内に存在すること（このことは補正歩容の運動による真のZMPが前記ZMP許容範囲内に存在することを意味する）

- 5 は、次式で表現される。ただし、 $M_{\max}$  は床反力モーメント許容範囲の上限値、 $M_{\min}$  は下限値である。

$$M_{\max} \geq \text{補正歩容の床反力モーメント} \geq M_{\min} \quad \cdots \text{式 3 3}$$

- 10 また、補正歩容の床反力水平成分が歩容補正用の床反力水平成分許容範囲内に存在することは、次式で表現される。ただし、 $F_{\max}$  は床反力水平成分許容範囲の上限値、 $F_{\min}$  は下限値である。

$$F_{\max} \geq \text{補正歩容の床反力水平成分} \geq F_{\min} \quad \cdots \text{式 3 4}$$

15

また、前述したように補正歩容の床反力モーメントは制限補正目標床反力モーメント  $M_{\text{ltid}}$ 、補正歩容の床反力水平成分は制限補正目標床反力水平成分  $F_{\text{ltid}}$  に一致またはほぼ一致する。

- したがって、式 3 3 および式 3 4 は、近似的にそれぞれ次式 3 5 およ  
20 び式 3 6 に変換される。

$$M_{\max} \geq M_{\text{ltid}} \geq M_{\min} \quad \cdots \text{式 3 5}$$

$$F_{\max} \geq F_{\text{ltid}} \geq F_{\min} \quad \cdots \text{式 3 6}$$

- 25 図 4 6 に示す、横軸に床反力水平成分の X 軸まわり成分（前後軸まわり成分）、縦軸に床反力モーメントの Y 軸まわり成分（左右軸まわり

成分)をとった座標系において、制限補正目標床反力水平成分  $F_{ltd}$  と制限補正目標床反力モーメント  $M_{ltd}$  の組 ( $F_{ltd}$ ,  $M_{ltd}$ ) を座標系上の点とすると、式 3 5、式 3 6 を満足する点の集合 (許容範囲) は、図 4 6 の長方形の境界およびその内部である。

- 5 図 4 6 の白丸 (同図では、白丸と後述の黒丸とが重なっている) のように、無制限時補正目標床反力モーメント  $Min$  が床反力モーメント許容範囲内に存在し、かつ、無制限時補正目標床反力水平成分  $Fin$  が床反力水平成分許容範囲内に存在している場合、すなわち、床反力モーメント許容範囲と床反力水平成分許容範囲で囲まれた長方形の範囲内に点
- 10 ( $Fin$ ,  $Min$ ) が存在している場合には、同図の黒丸で示す如く、 $M_{ltd}$  は無制限時補正目標床反力モーメント  $Min$  にし、 $F_{ltd}$  は無制限時補正目標床反力水平成分  $Fin$  にする。当然のごとく、このようにするだけで、式 3 5 と式 3 6 が成立する。すなわち、補正歩容の床反力モーメントが床反力モーメント許容範囲内に存在し、かつ補正歩容の床反力水平
- 15 成分が床反力水平成分許容範囲内に存在する。しかも、無制限時補正目標床反力モーメント  $Min$ 、無制限時補正目標床反力水平成分  $Fin$  に制限をかけずに (修正せずに) そのまま  $M_{ltd}$ 、 $F_{ltd}$  として出力されるので、前記補正用摂動モデル上体位置と前記補正用摂動モデル上体姿勢角を適切に安定化し、発散を防止することができる。

- 20 図 4 7 ~ 図 4 9 の白丸のように、無制限時補正目標床反力モーメント  $Min$  が床反力モーメント許容範囲内に存在していないか、あるいは、無制限時補正目標床反力水平成分  $Fin$  が床反力水平成分許容範囲内に存在していない場合、すなわち、床反力モーメント許容範囲と床反力水平成分許容範囲とで囲まれた長方形の範囲に点 ( $Fin$ ,  $Min$ ) が存在し
- 25 ていない場合には、次のように  $M_{ltd}$  と  $F_{ltd}$  とが決定される。

まず、 $M_{ltd}$  および  $F_{ltd}$  の決定法を説明する前に、その決定における

方針を説明する。

単に、 $M_{ltd}$  を無制限時補正目標床反力モーメント  $Min$  にし、 $F_{ltd}$  を無制限時補正目標床反力水平成分  $Fin$  にすると、補正歩容の床反力モーメントが床反力モーメント許容範囲内に存在しない、あるいは、補正歩容の床反力水平成分が床反力水平成分許容範囲内に存在しなくなる。

この時の上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント  $M_{pf}$  と上体姿勢角補正用摂動モデル安定化モーメント  $M_{rf}$  は前記式 20 および式 21 において、 $M_{ltd}$  に  $Min$ 、 $F_{ltd}$  に  $Fin$  を代入することで得られる。

補正歩容の床反力モーメントが床反力モーメント許容範囲内に存在し、かつ補正歩容の床反力水平成分が床反力水平成分許容範囲内に存在するためには、このようにして得られた  $M_{pf}$  または  $M_{rf}$  を変更する必要がある。この際、本実施形態では、 $M_{rf}$  が上体姿勢角補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $M_{rfdmd}$  にできる限り一致すること、すなわち、 $M_{rf}$  の  $M_{rfdmd}$  からの修正が最小になることを優先させることとする。

この理由を以下に述べる。

上体姿勢角補正用摂動モデル 203 で補正できる床反力モーメントは、比較的小さく、大きなモーメントを補正しようとする、上体姿勢角が大きく変動する。したがって、逆フルモデル 201 を用いた単純化モデル歩容の補正は、できる限り上体水平位置補正用摂動モデル 202 の動きを単純化モデル歩容に加えることによって行なうことが望ましい。そして、上体水平位置補正用摂動モデル 202 の動きで補正しきれない場合に上体姿勢角補正用摂動モデル 203 の動きを単純化モデル歩容に加えることによって該単純化モデル歩容を補正するのが望ましい。故に、上体姿勢角補正用摂動モデル 203 を復元させる（基準上体姿勢角に復元させる）ことを、上体水平位置補正用摂動モデル 202 を復元させる（上体水平位置を安定な位置に復元させる）ことよりも優先するのが望

ましい。すなわち、上体姿勢角補正用摂動モデル 2 0 3 を復元させるための操作量である  $M_{rf}$  が上体姿勢角補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $M_{rfdmd}$  にできる限り一致することを優先させることが望ましい。

- 5      さて、 $M_{rf}$  が上体姿勢角補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $M_{rfdmd}$  に一致するためには、式 2 0 と式 2 1 とにおいて、 $M_{ltd}$  に  $M_{in}$ 、 $F_{ltd}$  に  $F_{in}$  を代入することで得られた  $M_{pf}$  と  $M_{rf}$  の内で、 $M_{rf}$  は変更されずに、 $M_{pf}$  だけが変更されなければならない。

- 10      ここで、 $F_{ltd}$  の変更量を  $\Delta F$  とし、 $M_{ltd}$  の変更量を  $\Delta M$  とする。つまり、次式のように  $F_{ltd}$  と  $M_{ltd}$  を変更するものとする。

$$F_{ltd} = F_{in} + \Delta F \quad \cdots \text{式 3 7}$$

$$M_{ltd} = M_{in} + \Delta M \quad \cdots \text{式 3 8}$$

- 15      ところで、前記式 2 0 および式 2 1 より、次式の関係が得られる。

$$M_{rf} = M_{ltd} - (F_{ltd} - F_{full} - F_0) * h \quad \cdots \text{式 3 9}$$

- 20      上記式 3 7 ～式 3 9 から明らかなように、次式が成立していれば、 $M_{rf}$  は変更されない。

$$\Delta M = \Delta F * h \quad \cdots \text{式 4 0}$$

- 25      以上より、 $\Delta F$  および  $\Delta M$  は、上記式 4 0 を満足しなければならない。

また、その上で、 $M_{pf}$  が上体水平位置補正用摂動モデル安定化モー

メント要求値  $M_{pfdmd}$  にできる限り近いことが望ましいので、変更量  $\Delta F$  (または  $\Delta M$ ) の絶対値ができる限り小さくなるように決定する。さらに式 37、式 38 を用いて、 $F_{ltd}$  と  $M_{ltd}$  とを決定する。これにより、少なくとも前記補正用摂動モデル上体姿勢角  $\theta_c$  を適切に安定化して発散を防止することができ、またその上で前記補正用摂動モデル上体水平位置  $X_c$  を可能な範囲で安定化して発散を防止することができる。

このようにして決定された  $F_{ltd}$  と  $M_{ltd}$  の組を、図 47、図 48 において黒丸点 ( $F_{ltd}$ ,  $M_{ltd}$ ) で表すと、黒丸点は、白丸点 ( $F_{in}$ ,  $M_{in}$ ) を通る、傾きが上体並進モード床反力比率  $h$  である直線と、式 35、式 36 で表される許容範囲の境界との交点の中で、最も白丸点 ( $F_{in}$ ,  $M_{in}$ ) に近い点となる。

補足すると、上記直線は、式 37、式 38、式 40 を満足する点 ( $F_{ltd}$ ,  $M_{ltd}$ ) の集合を意味する。また、白丸点の状態から、上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント  $M_{pf}$  だけを変更すると、 $M_{ltd}$  の変更量  $\Delta M$  と  $F_{ltd}$  の変更量  $\Delta F$  の比が上体並進モード床反力比率  $h$  となることから、上記直線が、( $F_{ltd}$ ,  $M_{ltd}$ ) を ( $F_{in}$ ,  $M_{in}$ ) に一致させた状態から上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント  $M_{pf}$  だけを変更した場合の ( $F_{ltd}$ ,  $M_{ltd}$ ) の組の集合を意味することがわかる。

ただし、図 49 のように、式 35、式 36、式 37、式 38、式 40 を満足する  $F_{ltd}$  と  $M_{ltd}$  が存在しない場合には、次のように  $F_{ltd}$  と  $M_{ltd}$  とが決定される。この場合には、 $M_r$  を変更しないことをあきらめ、 $M_r$  の変更量ができる限り小さくなるように考慮する。

そこで、式 40 の代わりに式 41 が用いられる。

$$\Delta M = \Delta F * h + \Delta M_{p2} \quad \cdots \text{式 41}$$

Fltd と Mltd は、式 3 5、式 3 6、式 3 7、式 3 8、式 4 1 を満足するように決定される。ただし、 $\Delta M_{p2}$  が 0 に近いほど、 $M_r$  の変更量が小さくなるので、 $\Delta M_{p2}$  の絶対値が最小となるように決定する。また、これらの条件を満足した上で、 $M_p$  が上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $M_{pfdmd}$  にできる限り近いことが望ましいので、 $\Delta F$  の絶対値ができる限り小さくなるように決定する。これにより、少なくとも前記補正用摂動モデル上体姿勢角  $\theta_c$  を可能な範囲で安定化して発散を防止し、またその上で、前記補正用摂動モデル上体水平位置  $X_c$  を可能な範囲で安定化して発散を防止することができる。

- 10      このようにして決定された Fltd と Mltd との組を、図 4 9 において黒丸点 (Fltd, Mltd) で表すと、黒丸点は、式 3 5、式 3 6 で表される許容範囲の長方形の境界線の頂点 (許容範囲の上限および下限を表す 4 本の線の交点) のうちで (より一般的には、許容範囲の境界線上の点のうちで)、白丸点 ( $F_{in}$ ,  $M_{in}$ ) を通る、傾きが上体並進モード床反力比率  $h$  である直線に最も近い点となる。

以上のごとく、目標 ZMP まわりの制限補正目標床反力モーメント Mltd と制限補正目標床反力水平成分 Fltd とが決定される。

- 尚、補足すると、床反力鉛直方向成分が 0 の時 (走行歩容の空中期) には、式 3 5、式 3 6 の上限値  $M_{max}$ 、 $F_{max}$  および下限値  $M_{min}$ 、 $F_{min}$  は 0 となるので、目標 ZMP まわりの制限補正目標床反力モーメント Mltd と制限補正目標床反力水平成分 Fltd は共に 0 となる。

再び図 1 3 フロー・チャートに戻り、以上のごとく S 0 3 8 の処理を行った後、S 0 4 0 に進み、時刻  $t$  を  $\Delta t$  だけ増やし、再び S 0 1 4 に戻り、S 0 1 4 から S 0 4 0 までの処理を繰り返す。

- 25      図 4 を参照してこの実施の形態に係る歩容生成装置の動作をさらに説明すると、歩容生成装置 1 0 0 において、上記したように補正歩容が生

成される。補正歩容のうち、補正上体位置姿勢（軌道）と目標腕姿勢（軌道）とは、ロボット幾何学モデル（逆キネマティクス演算部）102に直接送られる。

また、その他の目標足平位置姿勢軌道、目標全床反力中心点（即ち、目標ZMP）軌道、および目標全床反力軌道（詳細には目標床反力鉛直成分軌道、補正目標床反力水平成分軌道、目標ZMPまわりの補正目標床反力モーメント軌道）は、複合コンプライアンス動作決定部104に直接送られると共に、目標床反力分配器106にも送られる。そして、該目標床反力分配器106にて、補正目標床反力は各足平22R, 22Lに分配され、目標各足平床反力中心点および目標各足平床反力が決定される。この決定された目標各足平床反力中心点および目標各足平床反力は複合コンプライアンス動作決定部104に送られる。

複合コンプライアンス動作決定部104から、機構変形補償付き修正目標足平位置姿勢（軌道）がロボット幾何学モデル102に送られる。

ロボット幾何学モデル102は、目標上体位置姿勢（軌道）と機構変形補償付き修正目標足平位置姿勢（軌道）を入力されると、それらを満足する両脚体2, 2の12個の関節（10R（L）など）の関節変位指令（値）を算出して変位コントローラ108に送る。変位コントローラ108は、ロボット幾何学モデル102で算出された関節変位指令（値）を目標値としてロボット1の両脚体2, 2の12個の関節の変位を追従制御する。また、ロボット幾何学モデル102は、目標腕姿勢を満足する腕関節の変位指定（値）を算出して変位コントローラ108に送る。変位コントローラ108は、ロボット幾何学モデル102で算出された関節変位指令（値）を目標値としてロボット1の腕体の10（もしくは8）個の関節の変位を追従制御する。

ロボット1に生じた床反力（詳しくは実各足床反力）は前記6軸力セ



ンサ 34 によって検出される。その検出値は前記した複合コンプライアンス動作決定部 104 に送られる。また、ロボット 1 に生じた姿勢傾斜偏差  $\theta_{errx}$ ,  $\theta_{erry}$  (詳しくは目標上体姿勢角に対する実姿勢角の偏差で、ロール方向 (X 軸回り) の姿勢角偏差が  $\theta_{errx}$  であり、ピッチ方向 (Y 軸回り) の姿勢角偏差が  $\theta_{erry}$  である) は前記傾斜センサ 36 によって検出され、その検出値は姿勢安定化制御演算部 112 に送られる。そして、該姿勢安定化制御演算部 112 にて、ロボット 1 の上体姿勢角を目標上体姿勢角に復元するための目標全床反力中心点 (目標 ZMP) まわりの補償全床反力モーメント算出される。さらに、この補償全床反力モーメントに、目標 ZMP まわりの前記補正目標床反力モーメントが加えられ、複合コンプライアンス動作決定部 104 に送られる。複合コンプライアンス動作決定部 104 は、入力値に基づいて補正目標床反力を修正する。具体的には、目標全床反力中心点 (目標 ZMP) 回りに補償全床反力モーメントと補正目標床反力モーメントとの和が作用するように目標床反力を修正する。

複合コンプライアンス動作決定部 104 は、修正された目標床反力に、センサ検出値などから算出される実ロボットの状態および床反力を一致させようと上記機構変形補償付き修正目標足平位置姿勢 (軌道) を決定する。ただしすべての状態を目標に一致させることは事実上不可能であるので、これらの間にトレードオフ関係を与えて妥協的になるべく一致させる。すなわち、各目標に対する制御偏差に重みを与えて、制御偏差 (あるいは制御偏差の 2 乗) の重み付き平均が最小になるように制御する。これにより、実際の足平位置姿勢と全床反力とが目標足平位置姿勢と目標全床反力とに概ね従うように制御される。

尚、この発明の要旨は歩容生成装置 100 におけるロボットの歩容生成にあり、上記した複合コンプライアンス動作決定部 104 などの構成

および動作は、本出願人が先に出願した特開平 1 0 - 2 7 7 9 6 9 号公報などに詳細に記載されているので、説明を以上に止める。

以上説明したように、本実施形態では、制限補正目標床反力モーメント  $M_{ltd}$  と制限補正目標床反力水平成分  $F_{ltd}$  は、補正歩容の真の Z M P が前記 Z M P 許容範囲内に存在し、かつ、補正歩容の床反力水平成分が床反力水平成分許容範囲内になるように決定される（Z M P 制約条件および床反力水平成分制約条件を満足するように決定される）。

また、上記制約条件下で、可能な限り、上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント  $M_p$  は、上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $M_{pfdmd}$  に一致または近い値になるように、上体姿勢角補正用摂動モデル安定化モーメント  $M_r$  は、上体姿勢角補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $M_{rfdmd}$  に一致または近い値になるように決定される。これにより、前記補正用摂動モデル上体位置  $X_c$  と前記補正用摂動モデル上体姿勢角  $\theta_c$  とを安定化し、発散することを防止する。

上体姿勢角補正用摂動モデル 2 0 3 で補正できる床反力モーメントは、比較的小さく、大きなモーメントを補正しようとする、上体姿勢角が大きく変動する。したがって、逆フルモデル 2 0 1 を用いた単純化モデル歩容の補正は、できる限り上体水平位置補正用摂動モデル 2 0 2 の動きを単純化モデル歩容に加えることによって行なわれる。そして、上体姿勢位置補正用摂動モデル 2 0 2 の動きによって補正しきれない場合に上体姿勢角補正用摂動モデル 2 0 3 の動きを単純化モデル歩容に加えることによって単純化モデル歩容の補正がなされることが望ましい。故に、上体姿勢角補正用摂動モデル 2 0 3 を復元させることも、上体水平位置補正用摂動モデル 2 0 2 を復元させることよりも優先するのが望ましい。すなわち、上体姿勢角補正用摂動モデル 2 0 3 を復元させるための操作量である  $M_{rf}$  が上体姿勢角補正用摂動モデル安定化モーメント要求値

Mrfdmd にできる限り一致することを優先させることが望ましい。

以上説明した第1実施形態と、本発明との対応関係を説明しておく。

第1実施形態は、前記した本願発明のうちの第1～第15発明（但し第11発明と、この第11発明を必要要件とする発明を除く。以下、特に  
5 第11発明に言及しない限り同様とする）に対応している。この場合、これらの第1～第15発明の許容範囲設定手段には、図13のフローチャートのS030、S036の処理が対応しており、並進床反力水平成分とZMP（真のZMP）とを制限対象量として、それらの許容範囲が設定される。また、第1～第15発明の仮瞬時値決定手段には、図13  
10 のフローチャートのS032の処理（単純モデル歩容瞬時値の算出処理）が対応している。この場合、特に、上体位置姿勢の瞬時値と、床反力水平成分の瞬時値と、目標ZMPと、目標ZMPまわりの床反力モーメントの瞬時値（＝0）とが仮目標瞬時値として求められる。また、第1～第15発明のモデル演算手段には、動力学モデルである逆フルモデル  
15 ル201により、モデル床反力瞬時値としてのフルモデル床反力水平成分  $F_{full}$  およびフルモデル床反力モーメント  $M_{full}$  を求める処理（特に  $M_{full}$  を求める処理）が対応している。また、第1～第15発明の目標瞬時値決定手段には、図13のフローチャートのS038の処理が対応している。この場合、フルモデル床反力モーメント  $M_{full}$  が、モデル床  
20 反力瞬時値と目標床反力の仮瞬時値との差に相当する。また、第3発明や第15発明に係わる目標床反力の目標瞬時値として、前記目標ZMPを作用点とした場合の前記補正目標床反力モーメントや補正目標床反力水平成分が求められる。

さらに、第1実施形態では、第4～第10発明並びに第12～第15  
25 発明（但し第11発明を必要要件とするものを除く）における摂動モデルとして、上体水平位置補正用摂動モデル202および上体姿勢角補正

量摂動モデル 203 が含まれている。この場合、摂動モデル操作量として、前記上体水平位置補正用摂動モデルモーメント  $M_p$  および上体姿勢角補正用摂動モデルモーメント  $M_r$  が決定されて、上記摂動モデル 202, 203 に入力され、前記補正用摂動モデル上体水平位置  $X_c$  および  
5 補正用摂動モデル上体姿勢角  $\theta_c$  が目標運動の補正量として求められる。また、前記フルモデル床反力モーメント  $M_{full}$  の符号を反転したもの（ $M_p$  演算部 214 に入力されるもの）が摂動モデル操作量の第 1 操作量成分として含まれると共に、上体水平位置補正用モデル安定化モーメント  $M_{pf}$  と上体姿勢角補正用モデル安定化モーメント  $M_{rf}$ （これは、  
10 第 1 実施形態では、 $M_r$  に等しい）とが摂動モデル操作量の第 2 操作量成分として含まれる。さらに、前記上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $M_{pfdmd}$  および上体姿勢角補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $M_{rfdmd}$  が摂動モデル操作量の要求値として用いられる。また、無制限時補正目標床反力モーメント  $M_{in}$  と無制限時補  
15 正目標床反力水平成分  $F_{in}$  とが第 12 発明および第 13 発明における制限対象量の推定値として前記  $M_{in}$  演算部 209 および  $F_{in}$  演算部 210 により求められると共に、制限済制限対象量として、前記制限補正目標床反力モーメント  $M_{ltd}$  と制限補正目標床反力水平成分  $F_{ltd}$  とが制限処理部 211 により求められる。この他、第 8 発明におけるロボッ  
20 トの所定の部位には、ロボット 1 の上体 24 が対応している。

なお、目標 ZMP まわりの床反力モーメントを 0 でないということは、真の ZMP が、該床反力モーメントを床反力鉛直成分で除算した量だけ目標 ZMP からずれるということと等価であるので、第 1 実施形態で用いる床反力モーメントは、目標床反力鉛直成分を用いて適宜、ZMP に  
25 換算してもよいことはもちろんである。

また、前記第 11 発明は、摂動モデルに対する要求値を持たないもの

であり、この場合の実施形態は、前記第1実施形態において、Mpfdmd  
および Mpfdmd をともに、0とすればよい。これにより、第11発明  
とこれを必要要件とする発明との実施形態が構築されることとなる。こ  
の実施形態と第11発明などとの対応関係は、上記の第1実施形態に関  
5 する対応関係と同様である。

次に本発明の第2実施形態を以下に説明する。第2実施形態に係る装  
置の補正手法は、フルモデルフィードバック補正型である。また、逆動  
力学フルモデル（逆フルモデル）を用いる手法で、かつ単純化モデル歩  
容の入力を補正しない手法であり、かつ摂動モデルを用いる手法である。

10 図50は、この第2実施形態に係る装置の動作、具体的には、図13  
フロー・チャートのS038の歩容の修正手法を説明する機能ブロック  
図である。ただし、図50の単純化モデル200は、第1実施形態と同  
様、単に動力学モデルだけでなく、前述のS010からS034の処理、  
すなわち単純化モデル歩容瞬時値の算出（決定）処理を表す。したがっ  
15 て、図50において、単純化モデル200から先の部分がS038の処  
理に相当する。なお、図50の機能部分のうち、第1実施形態に係る図  
42と同一の機能分については、図42と同一の参照符号を用いる。

S038の処理以外の構成は第1実施形態と同じであるので説明を省  
略し、以下に図50を用いてS038の処理を詳細に説明する。

20 S038では、まず、前述のごとく図13のS032で求めた単純化  
モデル歩容の目標上体水平位置の瞬時値（現在時刻 $t$ の制御周期で求め  
た仮瞬時値）に、前回制御周期（時刻 $t - \Delta t$ ）で後述のごとく算出し  
た補正用摂動モデル上体水平位置  $X_c$  を演算部205により加えること  
により、補正目標上体水平位置が求められる。また、図13のS032  
25 で求めた単純化モデル歩容の目標上体姿勢角の瞬時値（現在時刻 $t$ の制  
御周期で求めた仮瞬時値）に、前回制御周期（時刻 $t - \Delta t$ ）で算出し

た後述する補正用摂動モデル上体姿勢角  $\theta_c$  を演算部 204 により加えることにより、補正目標上体姿勢角が求められる。そして、これらの補正目標上体水平位置および補正目標上体姿勢角が、それぞれ上体水平位置および上体姿勢角の最終的な目標瞬時値として出力される。

- 5      すなわち、前記式 24、式 25 により、補正目標上体水平位置と補正目標上体姿勢角とが求められる。

次いで、補正目標上体水平位置、補正目標上体姿勢角、および前述のごとく得られた単純化モデル歩容の目標重心位置、目標足平位置姿勢、目標腕姿勢などの運動変数の瞬時値と目標 ZMP の瞬時値とを、前記逆  
10   動力学フルモデル 201 に入力し、その入力された運動変数で表される運動に釣り合う（すなわち運動によって逆フルモデル 201 が発生する）床反力水平成分と目標 ZMP まわりの床反力モーメントとが算出される。従って、本実施形態では、逆フルモデル 201 には、単純化モデル上体水平位置および上体姿勢角に加えて、補正用摂動モデル上体水平  
15   位置  $X_c$  と補正用摂動モデル上体姿勢角  $\theta_c$  とが追加的に入力される。以降、第 1 実施形態と同様、逆フルモデル 201 により算出された床反力水平成分、床反力モーメントをそれぞれフルモデル床反力水平成分  $F_{full}$ 、フルモデル床反力モーメント  $M_{full}$  と呼ぶ。

フルモデル床反力水平成分  $F_{full}$  とフルモデル床反力モーメント  
20    $M_{full}$  とは、それぞれ補正目標床反力水平成分（現在時刻  $t$  における床反力水平成分の最終的な目標瞬時値）、補正目標床反力モーメント（現在時刻  $t$  における床反力モーメントの最終的な目標瞬時値）として出力される。

すなわち、以下の式により、補正目標床反力水平成分と補正目標床反  
25   力モーメントとが決定されて出力される。

補正目標床反力水平成分 = フルモデル床反力水平成分  $F_{full}$

…式 4 8

補正目標床反力モーメント = フルモデル床反力モーメント  $M_{full}$

5

…式 4 9

以上の処理からわかるように、本実施形態では、フルモデル歩容は、単純化モデル歩容に上体水平位置補正用摂動モデル 2 0 2 の挙動と上体姿勢角補正用摂動モデル 2 0 3 の挙動とを加えたものになる。したがって、次式が成立する。ただし、単純化モデル床反力モーメントおよび単純化モデル床反力水平成分は、それぞれ、単純化モデル歩容の運動によって発生する床反力を逆フルモデル 2 0 1 を用いて算出したもののモーメント成分と並進力水平成分とである。

10

15 フルモデル床反力モーメント  $M_{full}$

= 単純化モデル床反力モーメント

+ 上体水平位置補正用摂動モデルモーメント  $M_p$

+ 上体姿勢角補正用摂動モデルモーメント  $M_r$

…式 5 0

20

フルモデル床反力水平成分  $F_{full}$

= 単純化モデル床反力水平成分

+ 上体水平位置補正用摂動モデル床反力水平成分  $F_p$

+ 上体姿勢角補正用摂動モデル床反力水平成分  $F_r$

25

…式 5 1

次いで、上体水平位置補正用摂動モデル制御則 206 により、上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $M_{pfdmd}$  が決定される。本実施形態における上体水平位置補正用摂動モデル制御則 206 は、特願 2001-133621 号で本願出願人が提案した如く、設定される。例えば、次式のように該制御則 206 が決定される。

$$\begin{aligned} & \text{上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント要求値 } M_{pfdmd} \\ & = K_{pg} * \text{重心差} + K_{vg} * \text{補正用摂動モデル上体水平速度 } dX_c/dt \end{aligned}$$

…式 5 2

10    ただし、重心差は、次式で求められる。

$$\text{重心差} = \text{フルモデル重心水平位置} - \text{単純化モデル重心水平位置}$$

…式 5 3

15    式 5 2 における  $K_{pg}$ 、 $K_{vg}$  はフィードバック制御のゲインであり、フルモデル重心水平位置、単純化モデル重心水平位置および補正用摂動モデル上体水平速度  $dX_c/dt$  は、それぞれ、前回（時刻  $t - \Delta t$ ）に後述のごとく算出したフルモデル歩容瞬時値の重心水平位置、単純化モデル歩容瞬時値の重心水平位置（単純化モデル歩容の瞬間姿勢を基に単純化モデルを用いて計算される重心水平位置  $XGs$ ）、および補正用摂動モデル上体水平速度  $dX_c/dt$  である。

20    即ち、フルモデル重心水平位置から単純化モデル重心水平位置を減算して得た重心差と摂動モデルの状態量のひとつである摂動モデル上体速度とに基づいて摂動モデル制御用フィードバック量（操作量）を演算するようにした。かかる摂動モデル制御則により、前記重心差の時間的平均値を、ほぼ 0 に制御することができる。



次いで、上体姿勢角補正用摂動モデル制御則 207 により、上体姿勢補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $Mrfdmd$  が決定される。これは、第 1 実施形態と同様の制御則を用いれば良い。従って、該制御則 207 としては、例えば前記式 11 が用いられる。

- 5 次いで、無制限時補正目標床反力モーメント  $Min$  が  $Min$  演算部 209 により求められる（推定される）。無制限時補正目標床反力モーメント  $Min$  は、第 1 実施形態と同様、前記制約（ZMP 制約条件および床反力水平成分制約条件）を無視して、上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント  $Mpf$  を上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $Mpfdmd$  に一致させ、かつ、上体姿勢角補正用摂動モデル安定化モーメント  $Mrf$  を、上体姿勢角補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $Mrfdmd$  に一致させた場合に、目標 ZMP まわりに発生する床反力モーメントである。
- 10

- 無制限時補正目標床反力モーメント  $Min$  は、第 1 実施形態と同様、  
15 前記式 13 の演算によって求められる。すなわち、無制限時補正目標床反力モーメント  $Min$  は、上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $Mpfdmd$  に上体姿勢角補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $Mrfdmd$  を加算することにより得られる。

- さらに、 $Fin$  演算部 210 により、無制限時補正目標床反力水平成分  
20  $Fin$  も求められる（推定される）。無制限時補正目標床反力水平成分  $Fin$  は、第 1 実施形態と同様、前記制約（ZMP 制約条件および床反力水平成分制約条件）を無視して、上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント  $Mpf$  を上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $Mpfdmd$  に一致させ、かつ、上体姿勢角補正用摂動モデル安定化  
25 モーメント  $Mrf$  を、上体姿勢角補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $Mrfdmd$  に一致させたとした場合に、逆フルモデル 201 が発生

する床反力水平成分 ( $F_{full}$  に相当) である。

無制限時補正目標床反力水平成分  $F_{in}$  は、第 1 実施形態とは異なり、次式により求められる。

5 無制限時補正目標床反力水平成分  $F_{in}$

= フルモデル床反力水平成分  $F_{full}$

+  $1/h$

\* (上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $M_{pfdmd}$

− 上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント  $M_{pf}$ )

10

…式 5 4

ただし、上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント  $M_{pf}$  は前回値 (時刻  $t - \Delta t$  での値) が用いられる。すなわち、上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $M_{pfdmd}$  と上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント  $M_{pf}$  の差を求め、上体水平位置補正用摂動モデルの入力を前記差だけ増加させることに起因するフルモデル床反力水平成分  $F_{full}$  の増加量を、前記差を上体並進モード床反力比率  $h$  で割ることにより推定する。さらに、これにフルモデル床反力水平成分  $F_{full}$  を加えることにより、無制限時補正目標床反力水平成分  $F_{in}$  が推定される。

20

前記式 1 3 によって無制限時補正目標床反力モーメント  $M_{in}$  が求められ (推定され)、式 5 4 によって無制限時補正目標床反力水平成分  $F_{in}$  が求められる (推定される) ことの証明は後述する。

次いで、第 1 実施形態と同様の制限手段 (制限処理部 2 1 1) によって、無制限時補正目標床反力モーメント  $M_{in}$  と無制限時補正目標床反力水平成分  $F_{in}$  とから、前記制約 (ZMP 制約条件および床反力水平

25

成分制約条件)を満足するように、これらに制限を加えた値である(目標ZMPまわりの)制限補正目標床反力モーメント  $M_{ltd}$  と制限補正目標床反力水平成分  $F_{ltd}$  とが決定される。この処理手法は、第1実施形態と同一である。

- 5 後述するように、補正目標床反力モーメントは制限補正目標床反力モーメント  $M_{ltd}$  にほぼ一致し、補正目標床反力水平成分は制限補正目標床反力水平成分  $F_{ltd}$  にほぼ一致するので、上記のごとく制限補正目標床反力モーメント  $M_{ltd}$  と制限補正目標床反力水平成分  $F_{ltd}$  を決定することによって、補正目標床反力モーメントおよび補正目標床反力水平成分は、それぞれZMP制約条件および床反力水平成分制約条件を  
10 ほぼ満足する。

- 次いで、 $M_{pf}$  演算部215によって、上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント  $M_{pf}$  が求められる。さらに詳細には、制限補正目標床反力水平成分  $F_{ltd}$  からフルモデル床反力水平成分  $F_{full}$  を減じた  
15 値にゲイン  $K_c$  を乗じたものを積分器215aにて積分し、さらに得られた積分値に上体並進モード床反力比率  $h$  を乗じることにより、上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント  $M_{pf}$  が求められる。すなわち、次式により、上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント  $M_{pf}$  が得られる。

20

$$M_{pf} = h * \int K_c(F_{ltd} - F_{full})dt \quad \dots \text{式 5 5}$$

- 次いで、 $M_{rf}$  演算部214によって、制限補正目標床反力モーメント  $M_{ltd}$  から上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント  $M_{pf}$  を減じ  
25 ることにより、上体姿勢角補正用摂動モデル安定化モーメント  $M_{rf}$  が求められる。すなわち、前記式21により、上体姿勢角補正用摂動モデ

ル安定化モーメント  $M_{rf}$  が得られる。

さらに、前記式 23 により、上体姿勢角補正用摂動モデル床反力モーメント  $M_r$  が決定される。すなわち、 $M_{rf}$  演算部 214 の出力である上体姿勢角補正用摂動モデル安定化モーメント  $M_{rf}$  がそのまま上体姿勢角補正用摂動モデル床反力モーメント  $M_r$  として決定される。

次いで、次式で定義されるフルモデル床反力モーメント誤差  $M_{err}$  が  $M_{err}$  演算部 216 により算出される。

$$M_{err} = M_{full} - M_{ltd} \quad \dots \text{式 56}$$

次いで、 $M_p$  演算部 217 により、次式に従って、上体水平位置補正用摂動モデル床反力モーメント  $M_p$  が求められる。

$$M_p = M_{pf} - \int K_m * M_{err} dt \quad \dots \text{式 57}$$

すなわち、フルモデル床反力モーメント誤差  $M_{err}$  に積分ゲイン  $K_m$  を乗じた値を積分器 217a にて積分すると共に、その積分値の符号を反転する。さらに、該積分器 217a の出力を上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント  $M_{pf}$  に加えることにより、上体水平位置補正用摂動モデル床反力モーメント  $M_p$  が求められる。

次いで、上体水平位置補正用摂動モデル床反力モーメント  $M_p$  を上体位置補正用摂動モデル 202 に入力して、入力された床反力モーメントに釣り合う補正用摂動モデル上体位置  $X_c$  が算出される。

また、上体姿勢角補正用摂動モデル床反力モーメント  $M_r$  を上体姿勢角補正用摂動モデル 203 に入力して、入力された床反力モーメントに釣り合う補正用摂動モデル上体姿勢角  $\theta_c$  が算出される。

求めた補正用摂動モデル上体位置  $X_c$ 、補正用摂動モデル上体姿勢角  $\theta_c$  および上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント  $M_{pf}$  は、前述のごとく次回制御周期（時刻  $t + \Delta t$ ）において、前回値として用いられる。

残余の構成および処理は、第 1 実施形態と同一である。

ここで、フルモデル床反力モーメント  $M_{full}$  が、制限補正目標床反力モーメント  $M_{ltd}$  にほぼ一致することを説明する。

前記逆動力学フルモデル（逆フルモデル）201 の入力を歩容の運動、出力を目標 ZMP まわりのフルモデル床反力モーメントとし、入力から出力までの伝達関数を  $1/G(S)$  とする。

単純化モデル 200 の入力を目標 ZMP まわりの床反力モーメント、出力を歩容の運動とし、入力から出力までの伝達関数を、前記逆動力学フルモデル 201 の逆関数  $G(S)$  とする。

ただし、単純化モデル 200 には、モデル化による誤差が含まれるので、出力は、次式のようにする。

$$20 \quad \text{出力} = G(\text{入力}) + G(d) \quad \dots \text{式 58}$$

ここで、 $d$  は単純化モデル 200 のモデル化誤差である。単純化モデル 200 が、完全に前記逆動力学フルモデル 201 の逆関数となっていれば、 $d$  は 0 であるが、一般的には、近似によりモデル化誤差  $d$  は 0 ではない。

上体水平位置補正用摂動モデル 202 および上体姿勢角補正用摂動モ

デル 2 0 3 の入力から出力（歩容の摂動分）までの伝達関数を、 $G_m(S)$  とする。

これらの伝達関数を用いて図 5 0 を書きかえると、図 5 1 になる。なお、図 5 1 において、モデル化床反力モーメント誤差推定値  $destm$  は、  
 5 前記  $M_p$  演算部 2 1 7 の積分器 2 1 7 a の出力、すなわち、フルモデル床反力モーメント誤差  $Merr$  にゲイン（ $-K_m$ ）を乗じたものの積分値を意味している（後述の図 5 2 ～ 5 7 においても同様）。

さらに、上体水平位置補正用摂動モデル 2 0 2 および上体姿勢角補正用摂動モデル 2 0 3 は、近似精度が高く次式が近似的に成立するものと  
 10 する。

$$G_m(S)=G(S) \quad \dots \text{式 5 9}$$

この場合、図 5 1 は、図 5 2 に近似される。

15 図 5 2 を変形して制限補正目標床反力モーメント  $M_{ltd}$  からフルモデル床反力モーメント誤差  $Merr$  までの伝達関数を求めると 0 になる。すなわち、フルモデル床反力モーメント誤差  $Merr$  は制限補正目標床反力モーメント  $M_{ltd}$  の影響を受けない。

また、図 5 2 を変形して、モデル化誤差  $d$  からフルモデル床反力モーメント誤差  $Merr$  までの伝達関数を求めると、次式が得られる。  
 20

$$Merr = S/K_m/(S/K_m+1)*d \quad \dots \dots \text{式 6 0}$$

すなわち、図 5 3 に示すごとく、フルモデル床反力モーメント誤差  
 25  $Merr$  は、モデル化誤差  $d$  をカットオフ角周波数が前記積分器 2 1 7 a のゲイン  $K_m[\text{rad/s}]$  のローカットフィルタに通したものに相当する。

モデル化誤差  $d$  の周波数成分は、歩容の周期を基準周波数として、通常 3 倍高調波成分以下の成分がほとんどなので、積分器 217a のゲイン  $K_m$  を十分大きくすれば、フルモデル床反力モーメント誤差  $M_{err}$  はほぼ 0 になる。

- 5      したがって、式 56 の左辺が 0 になるので、フルモデル床反力モーメント  $M_{full}$  は、制限補正目標床反力モーメント  $M_{ltd}$  にほぼ一致する。

次に、フルモデル床反力  $F_{full}$  が、制限補正目標床反力モーメント  $F_{ltd}$  にほぼ一致することを説明する。

- 10      前記逆動力学フルモデル 201 の入力を上体水平位置、出力をフルモデル床反力水平成分とし、入力から出力までの伝達関数を  $1/G_p(S)$  とする。

逆フルモデル 201 を用いて算出した単純化モデル歩容の床反力水平成分を単純化モデル歩容床反力水平成分  $F_s$  と呼ぶ。

- 15      この定義より、単純化モデル 200 の入力を単純化モデル歩容床反力水平成分  $F_s$ 、単純化モデル 200 の出力を単純化モデル上体水平位置とすると、入力から出力までの伝達関数は  $G_p(S)$  となる。すなわち次式が成立する。

$$\text{上体水平位置} = G_p(S) * F_s \quad \dots \text{式 61}$$

20

- また、上体姿勢角補正用摂動モデル 203 の床反力水平成分は常に 0 であるから、上体姿勢角補正用摂動モデル 203 の出力を前記逆動力学フルモデル 201 に入力しても、フルモデル床反力水平成分は影響を受けない。すなわち、上体姿勢角補正用摂動モデル 203 の入力からフル  
25      モデル床反力水平成分までの伝達関数は 0 である。

これらの関係を用いて図 50 を書きかえると、図 54 になる。

$G_m(S)$ は、前述のごとく、上体水平位置補正用摂動モデル 202 および上体姿勢角補正用摂動モデル 203 の入力から出力（歩容の摂動分）までの伝達関数である。

さらに図 54 を変換すると、図 55 になる。

- 5 図 55 の中の  $G_m(S)/G_p(S)$  は、上体水平位置補正用摂動モデルの床反力モーメント  $M_p$  から床反力水平成分  $F_p$  までの伝達関数である。 $G_m(S)/G_p(S)$  は、前記式 a19、式 a20 から  $X_c$  を消去することにより得られ、次式となる。

$$10 \quad G_m(S)/G_p(S) = 1/h * S^2/(S^2 - 1/h/m_b * F_{bz}) \quad \dots \text{式 6 4}$$

ここで、 $S^2$  は  $S$  の 2 乗を表す。

- 式 64 で表される上体水平位置補正用摂動モデル 202 は発散系であるが、発散の時定数は低い。例えば、人間と同程度の高さのロボットでは、発散の時定数は 3 [rad/s] 程度である。すなわち、補正用摂動モデル上体水平位置  $X_c$  はゆっくり変化する。

また、前記式 a19、式 a20 より、次式が成立する。

$$F_p = 1/h * X_c * F_{bz} + 1/h * M_p \quad \dots \text{式 6 5}$$

20

上体床反力鉛直成分  $F_{bz}$  も補正用摂動モデル上体水平位置  $X_c$  と同様、歩容の周期を基準周波数として、通常、3 倍高調波成分以下の成分がほとんどである。

- したがって、前記  $M_{pf}$  演算部 215 の積分器 215 a のゲイン  $K_c$  が  
25 十分に大きければ、図 55 の閉ループ系の応答速度は、式 65 の右辺第 1 項の変動周波数よりも十分に高くなるので、式 65 の右辺第 1 項は、



補正用摂動モデル上体水平位置  $X_c$  によって発生する床反力水平成分のドリフトと考えることができる。このドリフトを  $d1$  とすると、式 6 5 は次のように近似できる。

$$5 \quad F_p = d1 + 1/h * M_p \quad \dots \text{式 6 6}$$

故に、図 5 5 は、図 5 6 に近似的に変換される。

ここで、フルモデル床反力水平成分誤差  $F_{err}$  を次式で定義する。

10 フルモデル床反力水平成分誤差  $F_{err}$

= フルモデル床反力水平成分  $F_{full}$  - 制限補正目標床反力水平成分  $F_{ltd}$

... 式 6 7

15 すなわち、フルモデル床反力水平成分  $F_{full}$  と制限補正目標床反力水平成分  $F_{ltd}$  との差をフルモデル床反力水平成分誤差  $F_{err}$  とする。

フルモデル床反力水平成分誤差  $F_{err}$  に注目して、図 5 6 を変換すると図 5 7 になる。

よって、次式が得られる。

20

$$F_{err} = S/Kc(S/Kc + 1) * (F_s - 1/h * destm - F_{ltd} + d1)$$

... 式 6 8

すなわち、フルモデル床反力水平成分誤差  $F_{err}$  は、 $(F_s - 1/h * destm - F_{ltd} + d1)$  をカットオフ角周波数が  $Kc[\text{rad/s}]$  のローカットフィルタに通したものに相当する。

25

( $F_s - 1/h * destm - Fltd + d1$ )内の各項は、歩容の周期を基準周波数として、通常、3倍高調波成分以下の成分がほとんどなので、 $K_c$ を十分大きくすれば、フルモデル床反力水平成分誤差  $F_{err}$  はほぼ0になる。

したがって、式67の左辺が0になるので、フルモデル床反力水平成分  $F_{full}$  は、制限補正目標床反力水平成分  $Fltd$  にほぼ一致する。

無制限時補正目標床反力モーメント  $Min$  は、定義より、上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント  $M_{pf}$  を上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $M_{pfdmd}$  に一致させ、かつ、上体姿勢角補正用摂動モデル安定化モーメント  $M_{rf}$  を、上体姿勢角補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $M_{rfdmd}$  に一致させた場合のフルモデル床反力モーメント  $M_{full}$  の値である。

上記の場合におけるフルモデル床反力モーメント  $M_{ltd}$  の値は、第2実施形態では前記式21が常に成立しているので、式21において、 $M_{pf}$  に  $M_{pfdmd}$  を代入し、 $M_{rf}$  に  $M_{rfdmd}$  を代入することにより得られる。

すなわち、上記の場合、次式が成立する。

$$M_{ltd} = M_{pfdmd} + M_{rfdmd} \quad \cdots \text{式 6 9}$$

ところで、前述したように、フルモデル床反力モーメント  $M_{full}$  は、常に、制限補正目標床反力モーメント  $M_{ltd}$  にほぼ一致する。よって、無制限時補正目標床反力モーメント  $Min$ 、すなわち、上記の場合のフルモデル床反力モーメント  $M_{full}$  の値は、前記式13で求められる。

図56より、次式の近似関係が得られる。

$$F_{full} = 1/h * M_{pf} + F_s + d1 - 1/h * destm \quad \cdots \text{式 7 1}$$

ある瞬間に式 7 1 が成立していると、この瞬間において、Mpf を上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント要求値 Mpfdmd に変更した場合のフルモデル床反力水平成分 Ffull である無制限時補正目標床反力水平成分 Fin は、次式で求められる。

5

$$F_{in} = 1/h * M_{pfdmd} + F_s + d1 - 1/h * destm \quad \dots \text{式 7 2}$$

Mpf から  $(F_s + d1 - 1/h * destm)$  までの伝達関数には直達項が含まれないので、瞬間的に Mpf の値を Mpfdmd に変更しても、 $(F_s + d1 - 1/h * destm)$  は瞬間的に影響を受けない。したがって、式 7 1 と式 7 2 の  $(F_s + d0 - 1/h * destm)$  は同一値である。

10

よって、式 7 1、式 7 2 から  $(F_s + d1 - 1/h * destm)$  を消去することにより、式 5 4 が得られる。

15

次に、床反力水平成分の制限と床反力モーメントの制限がいずれもかからなかった場合、すなわち、 $F_{in}=F_{ltd}$  かつ  $M_{in}=M_{ltd}$  の場合の性質を説明する。

$F_{in}=F_{ltd}$  であるから、図 5 0 からわかるように、上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント要求値 Mpfdmd と上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント Mpf の関係は次のようになる。

20

$$M_{pf} = 1/(S/K_c + 1) * M_{pfdmd} \quad \dots \text{式 7 3}$$

25

すなわち、上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント Mpf は、上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント要求値 Mpfdmd を時定数  $1/K_c$  の一次遅れローパスフィルタに通したものとなる。したがって、積分ゲイン  $K_c$  を十分大きくすれば、上体水平位置補正用摂動モデ

ル安定化モーメント  $M_{pf}$  は、上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $M_{pfdmd}$  にほぼ一致する。したがって、上体水平位置補正用摂動モデル 202 の上体水平位置を適切に安定化することができる。すなわち、補正歩容の上体水平位置が発散することを適切に防止す

5 ることができる。

なお、後退差分により離散化すると、次式になる。

$$\text{今回 } M_{pf} = \text{前回 } M_{pf} + (\Delta T / (T + \Delta T)) * (M_{pfdmd} - \text{前回 } M_{pf})$$

…式 7 4

10

ここで、 $T$  は時定数であり、 $T=1/K_c$  である。

したがって、特に、 $K_c$  を無限大にすると（時定数  $T$  を 0 にすると）、上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント  $M_{pf}$  は、上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $M_{pfdmd}$  に厳密に一致す

15

る。

また、 $F_{in}=F_{ltd}$  かつ  $M_{in}=M_{ltd}$  であるから、上記のごとく上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $M_{pfdmd}$  と上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント  $M_{pf}$  がほぼ一致することを踏まえると、図 50 からわかるように、次式が（近似的に）成立する。

20

$$M_{rf} = M_{rfdmd} \quad \dots \text{式 7 5}$$

25

すなわち上体姿勢角補正用摂動モデル安定化モーメント  $M_{rf}$  は上体姿勢角補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $M_{rfdmd}$  に一致またはほぼ一致する。したがって、上体姿勢角補正用摂動モデル 203 の上体姿勢角を適切に安定化することができる。すなわち、補正歩容の上体

姿勢角が発散することを適切に防止することができる。

最後に、床反力水平成分の制限または床反力モーメントの制限の少なくともいずれかがかかった場合 ( $F_{in} \neq F_{ltd}$  または  $M_{in} \neq M_{ltd}$  の場合) の性質を説明する。

- 5       この場合、制限手段（制限処理部 211）は、制限手段の詳細説明で述べたごとく、上体姿勢角補正用摂動モデル安定化モーメント  $M_{rf}$  が上体姿勢角補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $M_{rfdmd}$  にできる限り一致することを優先させるので、少なくとも前記補正用摂動モデル上体姿勢角  $\theta_c$  を優先的に可能な範囲で安定化し、また、その上で前
- 10   記補正用摂動モデル上体水平位置  $X_c$  をできる限り適切に安定化することができる。

- 以上のごとく、第2実施形態では、単純化モデル歩容を摂動モデル 202, 203 によって補正した補正目標運動を逆フルモデル 201 に入力し、逆フルモデル 201 によって算出された床反力を補正目標床反力
- 15   としたので、補正目標運動（補正目標上体位置姿勢など）と補正床反力（補正目標床反力水平成分および補正目標床反力モーメント）から成る補正歩容が動学的平衡条件（重力と慣性力との合力が目標 ZMP まわりに作用するモーメントが 0 であること）を精度良く満足するように生成される。

- 20   また、上体水平位置・姿勢角を補正するための摂動モデル 202, 203 を持ち、その出力により、単純化モデル歩容の目標上体水平位置・姿勢角を補正するとともに、制限手段（制限処理部 211）の出力である制限補正目標床反力水平成分  $F_{ltd}$  および制限補正目標床反力モーメント  $M_{ltd}$  をそれぞれ補正目標床反力水平成分および補正目標床反力モーメントにほぼ一致するように、前記摂動モデル 202, 203 への操
- 25   作量を入力するフィードバックループを構成し、かつ、制限手段（制限

処理部 211) により制限補正目標床反力水平成分  $F_{ltd}$  および制限補正目標床反力モーメント  $M_{ltd}$  が許容範囲（床反力水平成分許容範囲と ZMP 許容範囲）を越えないように制限したので、補正目標床反力水平成分および補正目標床反力モーメントも、前記許容範囲を越えなくなり、

5 安定余裕が高く、かつスリップし難い歩容に補正される。

また、前記摂動モデル 202, 203 を安定化するように摂動モデル 202, 203 に入力または付加的に入力すべき操作量の要求値を決定する制御則を持ち、前記制限手段により、制限補正目標床反力水平成分  $F_{ltd}$  および制限補正目標床反力モーメント  $M_{ltd}$  をそれぞれ前記許容範囲を越えないように制限しつつ、できる限り、制御則が決定した操作量の要求値に近いように前記摂動モデル 202, 203 への操作量を決定し前記摂動モデル 202, 203 に入力するようにしたので、前記摂動モデル 202, 203 の安定性が高まり、補正歩容の発散が防止される。

10

また、制御則が決定した操作量の要求値をそのまま前記摂動モデル 202, 203 に操作量として入力すると仮定した場合に、制限補正目標床反力水平成分  $F_{ltd}$  および制限補正目標床反力モーメント  $M_{ltd}$  の少なくともいずれかが前記許容範囲を越えそうな場合には、上体水平位置（上体水平位置補正用摂動モデル）の安定化よりも上体姿勢角（上体姿勢角補正用摂動モデル）の安定化を優先するようにしたので、上体姿勢角がより一層安定になり、より自然な姿勢の歩容に補正される。

15

20

ここで、以上説明した第 2 実施形態と本発明との対応関係を説明しておく。第 2 実施形態は、前記した本願発明のうちの第 1 ～ 第 10 発明並びに第 16 ～ 第 22 発明（但し第 17 発明と、この第 17 発明を必要要件とする発明を除く。以下、特に第 17 発明に言及しない限り同様とする）に対応している。この場合、これらの第 1 ～ 第 10 発明並びに第 16 ～ 第 22 発明の許容範囲設定手段には、図 13 のフローチャートの S

25

030、S036の処理が対応しており、並進床反力水平成分とZMP  
(真のZMP)とを制限対象量として、それらの許容範囲が設定される。  
また、第1～第10発明並びに第16～第22発明の仮瞬時値決定手段  
には、図13のフローチャートのS032の処理(単純モデル歩容瞬時  
5 値の算出処理)が対応している。この場合、特に、上体位置姿勢の瞬時  
値と、床反力水平成分の瞬時値と、目標ZMPと、目標ZMPまわりの  
床反力モーメントの瞬時値(=0)とが仮目標瞬時値として求められる。  
また、第1～第10発明並びに第16～第22発明のモデル演算手段に  
は、動力学モデルである逆フルモデル201により、モデル床反力瞬時  
10 値としてのフルモデル床反力水平成分  $F_{full}$  およびフルモデル床反力モ  
ーメント  $M_{full}$  を求める処理(特に  $M_{full}$  を求める処理)が対応して  
いる。また、第1～第10発明並びに第16～第22発明の目標瞬時値  
決定手段には、図13のフローチャートのS038の処理が対応してい  
る。この場合、フルモデル床反力モーメント  $M_{full}$  が、モデル床反力瞬  
15 時値と目標床反力の仮瞬時値との差に相当する。また、第3発明に係わ  
る目標床反力の目標瞬時値として、前記目標ZMPを作用点とした場合  
の前記補正目標床反力モーメントや補正目標床反力水平成分が求められ  
る。但し、この場合、第16発明に対応して、目標運動の仮瞬時値の補  
正量としての、補正用摂動モデル上体水平位置  $X_c$  および補正用摂動モ  
20 デル上体姿勢角  $\theta_c$  が逆フルモデル201に追加的に入力される。そし  
て、第22発明に対応して、補正目標床反力モーメントや補正目標床反  
力水平成分は、逆フルモデル201の出力(モデル床反力瞬時値)とし  
て得られる。

さらに、第2実施形態では、第4～第10発明並びに第18～第22  
25 発明(但し第17発明を必要要件とするものを除く)における摂動モデ  
ルとして、上体水平位置補正用摂動モデル202および上体姿勢角補正

量摂動モデル 203 が含まれている。この場合、摂動モデル操作量として、前記上体水平位置補正用摂動モデルモーメント  $M_p$  および上体姿勢角補正用摂動モデルモーメント  $M_r$  が決定されて、上記摂動モデル 202, 203 に入力され、前記補正用摂動モデル上体水平位置  $X_c$  および  
5 補正用摂動モデル上体姿勢角  $\theta_c$  が目標運動の補正量として求められる。また、少なくともフルモデル床反力モーメント  $M_{full}$  (前記モデル床反力瞬時値と目標床反力の仮瞬時値との差に相当) に応じて決定される積分器 217 a の出力が ( $M_p$  演算部 214 に入力されるもの) が摂動モデル操作量の第 1 操作量成分として含まれると共に、上体水平位置補正  
10 用モデル安定化モーメント  $M_{pf}$  と上体姿勢角補正用モデル安定化モーメント  $M_{rf}$  (これは、第 2 実施形態では、 $M_r$  に等しい) とが摂動モデル操作量の第 2 操作量成分として含まれる。さらに、前記上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $M_{pfdmd}$  および上体姿勢角補正用摂動モデル安定化モーメント要求値  $M_{rfdmd}$  が摂動モデル操作  
15 量の要求値として用いられる。また、無制限時補正目標床反力モーメント  $M_{in}$  と無制限時補正目標床反力水平成分  $F_{in}$  とが第 18 ~ 第 20 発明における制限対象量の推定値として前記  $M_{in}$  演算部 209 および  $F_{in}$  演算部 210 により求められると共に、制限済制限対象量として、前記制限補正目標床反力モーメント  $M_{ltd}$  と制限補正目標床反力水平成分  $F_{ltd}$  とが制限処理部 211 により求められる。この他、第 8 発明におけるロボットの所定の部位には、ロボット 1 の上体 24 が対応している。  
20

なお、第 2 実施形態で用いる床反力モーメントは、目標床反力鉛直成分を用いて適宜、ZMP に換算してもよいことは前記第 1 実施形態の場合と同様である。  
25

また、前記第 17 発明は、摂動モデルに対する要求値を持たないもの



であり、この場合の実施形態は、前記第2実施形態において、Mpf dmd  
および Mpr dmd をともに、0 とすればよい。これにより、第17発明  
とこれを必要要件とする発明との実施形態が構築されることとなる。こ  
の実施形態と第17発明などとの対応関係は、上記の第2実施形態に関  
5 する対応関係と同様である。

次に、本発明の第3実施形態を説明する。第3実施形態に係る装置の  
補正手法は、フルモデルフィードバック補正型である。また、逆動力学  
フルモデル（逆フルモデル）を用いる手法で、かつ単純化モデル歩容の  
入力を補正する手法であり、かつ摂動モデルを用いない手法である。

10 図58は、第3実施形態に係る装置の動作、具体的には、図13のフ  
ローチャートのS038の歩容の修正手法を説明する機能ブロック図で  
ある。なお、図58では、第2実施形態に係る図50と同一機能部分に  
ついては、図50を同一の参照符号を用いる。

また、本実施形態の説明では、上体水平位置補正用摂動モデル安定化  
15 モーメント要求値 Mpf dmd は、名称を上体水平位置安定化モーメント  
要求値 Mpf dmd と改める。なぜなら、本実施形態は、摂動モデルを持  
っていない、また、Mpf dmd は、単純化モデル200の上体水平位置を  
安定化させるために用いられるからである。同様に上体姿勢角補正用摂  
動モデル安定化モーメント要求値 Mrf dmd も、上体姿勢角安定化モー  
20 メント要求値 Mrf dmd と改める。同様に、上体水平位置補正用摂動モ  
デル安定化モーメント Mpf は上体水平位置安定化モーメント Mpf に、  
上体姿勢角補正用摂動モデル安定化モーメント Mrf は上体姿勢角安定  
化モーメント Mrf に、上体姿勢角補正用摂動モデルモーメント Mr は  
単純化モデル上体姿勢角補正用モーメント Mr に、上体水平位置補正用  
25 摂動モデルモーメント Mp は単純化モデル上体水平位置補正用モーメン  
ト Mp に、名称を改める。

ただし、図 5 8 の単純化モデル 2 0 0 は、単に動力学モデルだけでなく、前述の図 1 3 の S 0 1 0 から S 0 3 4 の処理、すなわち単純化モデル歩容瞬時値の算出（決定）処理を表す。また、S 0 3 2 の今回歩容瞬時値（単純化モデル歩容瞬時値）の算出（決定）処理においては、前記

5 第 1 実施形態で説明したように目標 Z M P まわりに床反力モーメントが発生しないように（補正目標床反力モーメントを 0 として）歩容の瞬時値を生成した上で、さらに第 2 実施形態において述べた上体姿勢角補正用摂動モデルモーメント  $M_r$  に相当する上体姿勢角補正用摂動モデルモーメント  $M_r$ （前回値）を発生する上体回転モードの摂動運動を付加す

10 ると共に、第 2 実施形態において述べた上体水平位置補正用摂動モデルモーメント  $M_p$  に相当する単純化モデル上体水平位置補正用モーメント  $M_p$ （前回値）を発生する上体並進モードの摂動運動を付加する。これにより、単純化モデル 2 0 0 が出力する歩容の瞬時値を補正する。

より具体的に説明すると、本実施形態における図 1 3 の S 0 3 2 の処理

15 においては、そのサブルーチン処理である図 3 7 の S 9 1 4 において、単純化モデル 2 0 0 で求めた上体水平加速度に、前記式 a 1 0 の右辺第 2 項を  $M_p$ （前回値）に等しいとした式、すなわち  $M_p = m_b \cdot (Z_b - Z_{zmp}) \cdot (d^2 X_b / dt^2)$  という式に基づいて求められる上体水平加速度 ( $d^2 X_b / dt^2$ ) を摂動分として加えてなる上体水平加速度を今回歩容の初期

20 から現在時刻  $t$  まで 2 階積分することにより、現在時刻  $t$  における上体水平位置の瞬時値が求められる。また、図 3 7 の S 9 1 4 において、単純化モデル 2 0 0 で求めた上体姿勢角加速度に、前記式 a 1 0 の右辺第 7 項を  $M_r$ （前回値）に等しいとした式、すなわち、 $M_r = J \cdot d^2 \theta_b / dt^2$  という式に基づいて求められる上体姿勢角加速度 ( $d^2 \theta_b / dt^2$ ) を摂動分

25 として加えてなる上体姿勢角加速度を今回歩容の初期から現在時刻  $t$  まで 2 階積分することにより、現在時刻  $t$  における上体姿勢角の瞬時値が

求められる。

図58において、単純化モデル200から先の部分がS038の処理に相当する。S032およびS038の処理以外は第1実施形態と同じであるので説明を省略し、以下に図58を用いてS038の処理を詳細に説明する。

S038では、まず、S030において上記のごとく単純化モデル上体水平位置補正用モーメント  $M_p$ （詳しくは時刻  $(t - \Delta t)$  の制御周期での前回値）を基に補正された単純化モデル水平上体位置が補正目標上体水平位置（時刻  $t$  での上体水平位置の最終的な目標瞬時値）として出力される。またさらに、S030において上記のごとく上体姿勢角補正用摂動モデルモーメント  $M_r$ （詳しくは時刻  $(t - \Delta t)$  の制御周期での前回値）を基に補正された単純化モデル上体姿勢角が補正目標上体姿勢角（時刻  $t$  での上体姿勢角の最終的な目標瞬時値）として出力される。

すなわち、式100、式101により、補正目標上体水平位置と補正目標上体姿勢角とが決定される。

補正目標上体水平位置 = 単純化モデル上体水平位置 …式100

補正目標上体姿勢角 = 単純化モデル上体姿勢角 …式101

次いで、補正目標上体水平位置（すなわち単純化モデル上体水平位置）、補正目標上体姿勢角（すなわち単純化モデル上体姿勢角）、および前述のごとく得られた単純化モデル歩容の目標全体重心位置、目標足平位置姿勢、目標腕姿勢などの運動変数の瞬時値と目標ZMPの瞬時値とを、前記逆動力学フルモデル（逆フルモデル）201に入力し、入力された運動変数で表される運動に釣り合う（すなわち運動によって逆フル

モデル 201 が発生する) 床反力水平成分と目標 ZMP まわりの床反力モーメントとが算出される。以降、第 2 実施形態と同様、これらの算出された床反力水平成分及び床反力モーメントをそれぞれフルモデル床反力水平成分  $F_{full}$ 、フルモデル床反力モーメント  $M_{full}$  と呼ぶ。

5      第 2 実施形態と同様、フルモデル床反力水平成分  $F_{full}$  とフルモデル床反力モーメント  $M_{full}$  とは、それぞれ補正目標床反力水平成分 (時刻  $t$  での床反力水平成分の最終的な目標瞬時値)、補正目標床反力モーメント (時刻  $t$  での床反力モーメントの最終的な目標瞬時値) として出力される。

10      本実施形態では、上体姿勢角補正用摂動モデルと上体水平位置補正用摂動モデルとを備えないので、上体水平位置補正用摂動モデル制御則と上体姿勢角補正用摂動モデル制御則に相当する処理は、後述するように、第 2 実施形態とは異なる。

15      このことを除けば、上記処理以降、上体姿勢角補正用摂動モデルモーメント  $M_r$  と単純化モデル上体水平位置補正用モーメント  $M_p$  とを決定するまでは、第 2 実施形態において、上体姿勢角補正用摂動モデルモーメント  $M_r$  と上体水平位置補正用摂動モデルモーメント  $M_p$  とを決定する処理と同一の処理が実行される。すなわち、Min 演算部 209、Fin 演算部 210、制限処理部 211 (制限手段)、Mpf 演算部 215、  
20      Merr 演算部 216、Mrf 演算部 217 (=  $M_r$  演算部)、及び  $M_p$  演算部 214 の処理は、前記第 2 実施形態と同一である。

25      上記のごとく求められた上体姿勢角補正用摂動モデルモーメント  $M_r$  と単純化モデル上体水平位置補正用モーメント  $M_p$  は、前述のごとく次回制御周期 (時刻  $t + \Delta t$ ) に、単純化モデル歩容瞬時値の決定 (生成) 時に前回値として用いられる。

残余の構成及び処理は、第 2 実施形態と同一である。

以下に、上体姿勢角安定化モーメント要求値  $Mrfdmd$  の決定方法について述べる。本実施形態では、 $Mrfdmd$  は、 $Mrfdmd$  決定処理部 218 にて、例えば次のように決定される。

すなわち、上体姿勢角安定化モーメント要求値  $Mrfdmd$  は、例えば  
5 前記基準上体姿勢角に補正目標上体姿勢角が追従するように、前記上体姿勢角補正用摂動モデル制御則 207 と同様に、決定すれば良い。

または、上体姿勢角安定化モーメント要求値  $Mrfdmd$  は、常に 0 でも良い。ただし、上体姿勢角が発散するおそれがあるので、次の 1 歩において歩容パラメータ（例えば前記  $ZMP_{rec}$  パターンなど）を調整する  
10 ことによって、上体姿勢角が発散しないようにする必要がある。

次に、上体水平位置安定化モーメント要求値  $Mpfdmd$  の決定方法について述べる。本実施形態では、 $Mpfdmd$  は、 $Mpfdmd$  決定処理部 219 にて例えば次のように決定される。

移動中においては、動力学的平衡条件を満足しなければならないので、  
15 基準上体姿勢角のように、基準の上体位置を任意に設定して、これに単純化モデル上体水平位置を追従または収束させることはできない。

そこで、少なくとも移動中においては、上体水平位置安定化モーメント要求値  $Mpfdmd$  を、常に 0 とする。前述したように、目標  $ZMP$  まわりの補正目標床反力モーメントは上体水平位置安定化モーメント要求  
20 値  $Mpfdmd$  にほぼ一致するので、この場合、目標  $ZMP$  まわりの補正目標床反力モーメントは、常にほぼ 0 になる。ただし、上体水平位置が発散する傾向があるので、次の 1 歩において歩容パラメータを調整する  
（例えば図 39 に関して説明した  $ZMP$  修正量パターンを、上体水平位置が定常歩容につながるように調整する）ことによって、上体水平位置  
25 が発散しないようにする必要がある。

直立時には、基準上体姿勢角のように、基準上体水平位置を設定し、

その位置に補正目標上体位置が収束するように上体水平位置安定化モーメント要求値  $M_{pfdmd}$  を決定しても良い。

例えば、次式で上体水平位置安定化モーメント要求値  $M_{pfdmd}$  を決定すれば良い。

$$M_{pfdmd} = K_{pb} * (\text{補正目標上体水平位置} - \text{基準上体水平位置}) \\ + K_{vb} * \text{補正目標上体水平速度}$$

…式 110

10      ここで、補正目標上体速度は補正目標上体位置の時間微分値である。  
 $K_{pb}$  および  $K_{vb}$  はゲインである。

15      なお、本実施形態では、単純化モデル 200 に追加的に入力される単純化モデル上体水平位置補正用モーメント  $M_p$  は、逆フルモデル 201 が出力するフルモデル床反力水平成分  $F_{full}$  (=補正目標床反力水平成分) が歩容補正用の床反力水平成分許容範囲を逸脱しないように決定されている。従って、図 13 の S032 で今回歩容瞬時値を決定する際に、図 37 の S912 の処理では、必ずしも床反力水平成分  $F_x$  が床反力水平成分許容範囲を越えないように上体水平加速度と上体姿勢角加速度とを決定する必要はない。従って、図 38 の S1006 ~ S1012 の処理で常に  $F_x = F_{xtmp}$  として、S912 の処理を実行するようにしてもよい。

25      ここで、以上説明した第 3 実施形態と本発明との対応関係を説明しておく。第 3 実施形態は、前記した本願発明のうちの第 23 発明 ~ 第 26 発明に対応している。この場合、これらの第 23 ~ 第 26 発明の許容範囲設定手段には、図 13 のフローチャートの S030、S036 の処理が対応しており、並進床反力水平成分と ZMP (真の ZMP) とを制限

対象量として、それらの許容範囲が設定される。また、第23～第26  
発明の目標床反力仮瞬時値決定手段には、図13のフローチャートのS  
032の処理のうちの一部（具体的には図37のS900やS902の  
処理、すなわち、目標床反力鉛直成分や目標ZMPの瞬時値算出処理）

5 に対応している。また、第23～第26発明の第1モデル演算手段には、  
第1動力学モデルとしての単純化モデル200により、図37のS91  
2およびS914で、上体位置姿勢の瞬時値（仮瞬時値）を求める処理  
に対応している。また、第23～第26発明の第2モデル演算手段には、

第2動力学モデルとしての逆フルモデル201により、モデル床反力瞬  
10 時値としてのフルモデル床反力水平成分  $F_{full}$  およびフルモデル床反力  
モーメント  $M_{full}$  を求める処理（特に  $M_{full}$  を求める処理）に対応し  
ている。また、第23～第26発明の第1モデル入力補正手段には、図  
13のフローチャートのS038の処理（逆フルモデル201の演算処  
理を除く）に対応している。この場合、フルモデル床反力モーメント  $M$   
15  $_{full}$  が、モデル床反力瞬時値と目標床反力の仮瞬時値との差に相当する。

また、前記単純化モデル上体水平位置補正用モーメント  $M_p$  および単純  
化モデル上体姿勢角補正用モーメント  $M_r$  が、目標床反力の補正量とし  
て求められ、それが、第1動力学モデルとしての単純化モデル200に  
追加的に入力される。そして、第2動力学モデルとしての逆フルモデル  
20 201の入力（単純化モデル200の出力）が目標運動の目標瞬時値  
（補正目標上体水平位置や、補正目標上体姿勢等）として決定される。

また、第25発明に対応して、逆フルモデル201の出力としての補正  
目標床反力モーメントや補正目標床反力水平成分が目標床反力の目標瞬  
時値として得られる。さらに、第26発明に係わる第1補正量成分には、

25 積分器217aの出力に対応し、第2補正量成分には、上体水平位置安  
定化モーメント  $M_{pf}$  と、上体姿勢角安定化モーメント  $M_{rf}$ （これは第

3 実施形態では、 $M_r$  に等しい) とが対応している。さらに、第 3 実施形態では、前記上体水平位置安定化モーメント要求値  $M_{pfdmd}$  および上体姿勢角安定化モーメント要求値  $M_{rfdmd}$  が目標床反力の補正量の要求値として用いられる。また、無制限時補正目標床反力モーメント

5  $M_{in}$  と無制限時補正目標床反力水平成分  $F_{in}$  とが第 26 発明における制限対象量の推定値として前記  $M_{in}$  演算部 209 および  $F_{in}$  演算部 210 により求められると共に、制限済制限対象量として、前記制限補正目標床反力モーメント  $M_{ltd}$  と制限補正目標床反力水平成分  $F_{ltd}$  とが制限処理部 211 により求められる。

10     なお、第 3 実施形態で用いる床反力モーメントは、目標床反力鉛直成分を用いて適宜、ZMP に換算してもよいことは前記第 1 実施形態の場合と同様である。

次に、本発明の第 4 実施形態を説明する。この第 4 実施形態に係る装置の補正手法は、前記第 2 実施形態と第 3 実施形態とを複合させた手法

15     である。図 59 は、この発明の第 4 実施形態に係る装置の動作、具体的には、図 13 フロー・チャートの S038 の歩容の修正手法を説明する機能ブロック図である。なお、図 59 では、第 2 実施形態もしくは第 3 実施形態と同一機能部分については、図 57 又は図 58 と同一の参照符号を用いる。

20     第 4 実施形態においては、上体水平位置補正用摂動モデル 202 と上体姿勢角補正用摂動モデル 203 とを備える。また、2つの分配器 220, 221 を備える。

分配器 220, 221 を定義すると、いずれも、1入力2出力の伝達ブロックであり、入力に応じて、一方の出力を決定し（例えば、入力に

25     周波数特性、不感帯特性、飽和特性などの信号処理を行って一方の出力を決定し）、2つの出力の和が入力に一致またはほぼ一致するように、



他方の出力を決定する伝達ブロックである。

分配器 220 には、制限補正目標床反力モーメント  $M_{ltd}$  と上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント  $M_{pf}$  との差 ( $M_r$  演算部 214 の出力) である上体姿勢角補正用モーメント  $M_r$  が入力され、上体姿勢角補正用摂動モデル 203 に入力する上体姿勢角補正用摂動モデル入力  $M_{ri}$  と、単純化モデル 200 に入力する単純化モデル上体姿勢角補正用モーメント  $M_{rs}$  とに分配される。この時、上体姿勢角補正用摂動モデル入力  $M_{ri}$  と単純化モデル上体姿勢角補正用モーメント  $M_{rs}$  との和が上体姿勢角補正用モーメント  $M_r$  に一致するように、上体姿勢角補正用摂動モデル入力  $M_{ri}$  と単純化モデル上体姿勢角補正用モーメント  $M_{rs}$  とが決定される (出力される)。

より具体的には、上体姿勢角補正用モーメント  $M_r$  に応じて、上体姿勢角補正用摂動モデル入力  $M_{ri}$  が決定される。例えば、上体姿勢角補正用モーメント  $M_r$  を不感帯特性、飽和特性、あるいは周波数特性を持つ信号処理を通して、上体姿勢角補正用摂動モデル入力  $M_{ri}$  が決定される。また、上体姿勢角補正用モーメント  $M_r$  から上体姿勢角補正用摂動モデル入力  $M_{ri}$  を差し引いたものが、単純化モデル上体姿勢角補正用モーメント  $M_{rs}$  として決定される。さらに具体的に説明すると、本実施形態では、分配器 220 は、例えば、入力 (上体姿勢角補正用モーメント  $M_r$ ) をローパスフィルタに通してなる低周波成分 (直流分) を単純化モデル上体姿勢角補正用モーメント  $M_{rs}$  として出力すると共に、その入力 (上体姿勢角補正用モーメント  $M_r$ ) から  $M_{rs}$  を差し引いた成分が上体姿勢角補正用摂動モデル入力  $M_{ri}$  として出力される。この場合、低周波成分 (直流分) である単純化モデル上体姿勢角補正用モーメント  $M_{rs}$  に関しては、不感帯特性を持たせておき、上記ローパスフィルタの出力が、ある所定値を中心とする所定範囲内に存在する状態では、

Mrs が該所定値（例えば 0）に維持されるようにしておく。

分配器 220 の出力である上体姿勢角補正用摂動モデル入力 Mri は、前記上体姿勢角補正用摂動モデル 203 に入力され、上体姿勢角補正用摂動モデル 203 により補正用摂動モデル上体姿勢角  $\theta_c$  が決定される。

- 5 分配器 220 のもうひとつの出力である単純化モデル上体姿勢角補正用モーメント Mrs は単純化モデル 200 に入力される。これは、前記図 58 の第 3 実施形態において、単純化モデル上体姿勢角補正用モーメント Mr を単純化モデル 200 に入力することに相当するものである。

- 10 分配器 221 においては、フルモデル床反力モーメント誤差 Merr にゲイン Km を乗じた値を積分器 217 a によって積分し、さらに符号を反転した値を入力とする。この入力、前記第 2 実施形態で説明したモデル化床反力モーメント誤差推定値 destm の符号を反転した値に相当する。

- 15 分配器 221 の入力、分配器 220 と同様、単純化モデル 200 に入力する単純化モデル上体水平位置補正用モーメント Mps と、上体水平位置補正用摂動モデル 202 に入力する誤差補正モーメント Me とに分配される。より具体的には、積分器 217 a の出力に応じて、誤差補正モーメント Me が決定される。例えば、積分器 217 a の出力（分配器 220 の入力）を不感帯特性、飽和特性、あるいは周波数特性を持つ  
20 信号処理を通して、誤差補正モーメント Me が決定される。また、積分器 217 a の出力から、誤差補正モーメント Me を差し引いたものが、単純化モデル上体姿勢角補正用モーメント Mrs として決定される。さらに具体的に説明すると、本実施形態では、分配器 221 は、例えば、入力（積分器 217 a の出力）をローパスフィルタに通してなる低周波  
25 成分（直流分）を単純化モデル上体水平位置補正用モーメント Mps として出力すると共に、その入力（積分器 217 a の出力）から Mps を

差し引いた成分を誤差補正モーメント  $M_e$  として出力する。この場合、低周波成分（直流分）である単純化モデル上体水平位置補正用モーメント  $M_{ps}$  に関しては、不感帯特性を持たせておき、上記ローパスフィルタの出力が、ある所定値を中心とする所定範囲内に存在する状態では、

5  $M_{ps}$  が該所定値（例えば 0）に維持されるようにしておく。

分配器 221 の出力である誤差補正モーメント  $M_e$  に上体水平位置補正用モデル安定化モーメント  $M_{pf}$  を  $M_p$  演算部 217b で加算することにより上体水平位置補正用摂動モデルモーメント  $M_p$  が求められる。そして、上体水平位置補正用摂動モデルモーメント  $M_p$  は、上体水平位置補正用摂動モデル 202 に入力され、上体水平位置補正用摂動モデル 202 により補正用摂動モデル上体水平位置  $X_c$  が決定される。

分配器 221 のもうひとつの出力である単純化モデル上体水平位置補正用モーメント  $M_{ps}$  は単純化モデル 200 に入力される。これは、前記図 58 の第 3 実施形態において、単純化モデル上体水平位置補正用モーメント  $M_p$  を単純化モデル 200 に入力することに相当するものである。

単純化モデル 200 は、第 3 実施例と同様、単純化モデル歩容瞬時値の算出（決定）処理において、目標 ZMP まわりに床反力モーメントが発生しないように歩容の瞬時値を生成した上で、単純化モデル上体姿勢角補正用モーメント  $M_{rs}$ （前回値）を発生する上体回転モードの摂動運動を付加すると共に、単純化モデル上体水平位置補正用モーメント  $M_{ps}$ （前回値）を発生する上体並進モードの摂動運動を付加して、歩容の瞬時値を補正する。

その他の構成及び処理は、第 2 実施例または第 3 実施例と同一である。より詳しくは、演算部 204、205、Merr 演算部 216、上体姿勢角補正用摂動モデル制御則 207、上体水平位置補正用摂動モデル制御

則 206、Min 演算部 209、Fin 演算部 210、制限処理部 211、Mpf 演算部 215 の処理は、前記第 2 実施形態と同一である。

5      なお、本実施形態では、前記第 3 実施形態に関して説明した場合と同様、図 13 の S032 で今回歩容瞬時値を決定する際に、図 37 の S912 の処理では、必ずしも床反力水平成分  $F_x$  が床反力水平成分許容範囲を越えないように上体水平加速度と上体姿勢角加速度とを決定する必要はない。従って、図 38 の S1006 ~ S1012 の処理で常に  $F_x = F_{xtmp}$  として、S912 の処理を実行するようにしてもよい。

10      各分配器 220、221 の出力の和は入力に一致しているので、第 2 実施形態と同様、補正目標床反力モーメント（フルモデル床反力モーメント  $M_{full}$ ）は制限補正目標床反力モーメント  $M_{ltd}$  に一致し、補正目標床反力水平成分（フルモデル床反力水平成分  $F_{full}$ ）は制限補正目標床反力水平成分  $F_{ltd}$  に一致する。したがって、前記制限手段（制限処理部 211）により、制限補正目標床反力モーメント  $M_{ltd}$  と制限補正目標床反力水平成分  $F_{ltd}$  に、許容範囲を越えないように制限を加えることにより、第 1 ~ 第 3 実施形態と同様、許容範囲を越えない適切な歩容（補正歩容）が生成される。

各分配器 220、221 の 2 つの出力のうち一方を 0 とし、他方を入力に一致させるようにしても良い。

20      分配器 220 の出力である単純化モデル上体姿勢角補正用モーメント  $M_{rs}$  を 0 にし、分配器 221 の出力である単純化モデル上体水平位置補正用モーメント  $M_{ps}$  を 0 にすると、第 2 実施形態と同一の作用効果を奏することとなる（事実上、第 2 実施形態のものと同一構成となる）。

25      分配器 220 の出力である上体姿勢角補正用摂動モデル入力  $M_{ri}$  を 0 にし、分配器 221 の出力である誤差補正モーメント  $M_e$  を 0 にすると、第 3 実施形態と同一の作用効果を奏することとなる（事実上、第 3

実施形態のものと同一構成となる)。

すなわち、第4実施形態は第2実施形態と第3実施形態とを包含したシステムになっている。

また、分配器220の出力である単純化モデル上体姿勢角補正用モーメント  $Mrs$  を0にし、分配器221の出力である誤差補正モーメント  $Me$  を0にしても良い。この場合、上体姿勢角補正用摂動モデルは省略できる。

また、分配器220の出力である上体姿勢角補正用摂動モデル入力  $Mri$  を0にし、分配器221の出力である単純化モデル上体水平位置補正用モーメント  $Mps$  を0にしても良い。

また、さらに、誤差補正モーメント  $Me$  に上体水平位置補正用モデル安定化モーメント  $Mpf$  を加算した値を図示しない第3の分配器に入力し、その出力の一方を上体水平位置補正用摂動モデルに入力し、もう一方の出力を単純化モデル上体水平位置補正用モーメント  $Mps$  に加算しても良い。この場合、分配器221の出力である単純化モデル上体水平位置補正用モーメント  $Mps$  を0にしても良い。すなわち、分配器221を省略し、フルモデル床反力モーメント誤差  $Merr$  にゲイン  $Km$  を乗じた値を積分して符号を反転した値を上体水平位置補正用モデル安定化モーメント  $Mpf$  に加算した値を第3の分配器に入力しても良い。

ここで、以上説明した第4実施形態と本発明との関係を説明しておく。第4実施形態は、前記した本願発明のうちの第23～第25発明並びに第27～第39発明（但し第35発明と、この第35発明を必要要件とする発明を除く。以下、特に第35発明に言及しない限り同様とする）に対応している。この場合、これらの第23～第25発明並びに第27～第39発明の許容範囲設定手段には、図13のフローチャートのS030、S036の処理が対応しており、並進床反力水平成分とZMP

(真のZMP)とを制限対象量として、それらの許容範囲が設定される。

また、第23～第25発明並びに第27～第39発明の目標床反力仮瞬時値決定手段には、図13のフローチャートのS032の処理のうちの一部(具体的には図37のS900やS902の処理、すなわち、目標

5 床反力鉛直成分や目標ZMPの瞬時値算出処理)が対応している。また、第23～第25発明並びに第27～第39発明の第1モデル演算手段には、第1動力学モデルとしての単純化モデル200により、図37のS912およびS914で、上体位置姿勢の瞬時値(仮瞬時値)を求める処理が対応している。また、第23～第25発明並びに第27発明～第

10 39発明の第2モデル演算手段には、第2動力学モデルとしての逆フルモデル201により、モデル床反力瞬時値としてのフルモデル床反力水平成分  $F_{full}$  およびフルモデル床反力モーメント  $M_{full}$  を求める処理(特に  $M_{full}$  を求める処理)が対応している。また、第23～第25

15 発明並びに第27～第39発明の第1モデル入力補正手段には、図13のフローチャートのS038の処理(逆フルモデル201の演算処理を除く)が対応している。この場合、フルモデル床反力モーメント  $M_{full}$  が、モデル床反力瞬時値と目標床反力の仮瞬時値との差に相当する。また、前記単純化モデル上体水平位置補正用モーメント  $M_{ps}$  および単純化モデル上体姿勢角補正用モーメント  $M_{rs}$  が、目標床反力の補正量として求められ、それが、第1動力学モデルとしての単純化モデル200

20 に追加的に入力される。そして、第2動力学モデルとしての逆フルモデル201の入力が目標運動の目標瞬時値(補正目標上体水平位置や、補正目標上体姿勢等)として決定される。また、第25発明に対応して、逆フルモデル201の出力としての補正目標床反力モーメントや補正目標床反力水平成分が目標床反力の目標瞬時値として得られる。さらに、

25 第27発明の第2モデル入力補正手段の処理に対応して、第2動力学モ

## 201

デルとしての逆フルモデル 201 には、目標運動の補正量として、補正用摂動モデル上体水平位置  $X_c$  および補正用摂動モデル上体姿勢角  $\theta_c$  が求められて追加的に入力される。

また、第 4 実施形態は、第 28～第 29 発明に係る摂動モデルとして、  
5 上体水平位置補正用摂動モデル 201 および上体姿勢角補正用摂動モデル 203 を備えると共に、分配手段として、分配器 220, 221 を備える。そして、これらの分配器 220, 221 に入力する床反力操作量として、積分器 217a の出力と上体姿勢角補正用モーメント  $M_r$  とが用いられる。また、前記第 29 発明および第 30 発明に係わる床反力操  
10 作量の要求値として、前記上体水平位置安定化モーメント要求値  $M_{pfdmd}$  および上体姿勢角安定化モーメント要求値  $M_{rfdmd}$  が用いられる。また、特に、第 36 発明に対応して、床反力操作量の第 1 操作量成分として、積分器 217a の出力が用いられ、第 2 操作量成分として、上体水平位置補正用モデル安定化モーメント  $M_{pf}$  と上体姿勢角補正用  
15 モデル安定化モーメント  $M_{pr}$  (これは第 4 実施形態では、分配器 220 に入力する上体姿勢角補正用モーメント  $M_r$  に等しい) とが用いられる。

第 26 発明に係わる第 1 補正量成分には、積分器 217a の出力が対応し、第 2 補正量成分には、上体水平位置安定化モーメント  $M_{pf}$  と、  
20 上体姿勢角安定化モーメント  $M_{rf}$  (これは第 4 実施形態では、 $M_r$  に等しい) とが対応している。さらに、第 4 実施形態では、前記上体水平位置安定化モーメント要求値  $M_{pfdmd}$  および上体姿勢角安定化モーメント要求値  $M_{rfdmd}$  が目標床反力の補正量の要求値として用いられる。また、無制限時補正目標床反力モーメント  $M_{in}$  と無制限時補正目標床  
25 反力水平成分  $F_{in}$  とが第 26 発明における制限対象量の推定値として前記  $M_{in}$  演算部 209 および  $F_{in}$  演算部 210 により求められると共

に、制限済制限対象量として、前記制限補正目標床反力モーメント  $M_{ltd}$  と制限補正目標床反力水平成分  $F_{ltd}$  とが制限処理部 211 により求められる。この他、第 32 発明におけるロボットの所定の部位には、ロボット 1 の上体 24 が対応している。

- 5        なお、第 4 実施形態で用いる床反力モーメントは、目標床反力鉛直成分を用いて適宜、ZMP に換算してもよいことは前記第 1 実施形態等の場合と同様である。

- また、前記第 35 発明は、床反力操作量に対する要求値を持たないものであり、この場合の実施形態は、前記第 4 実施形態において、  
10     $M_{pfdmd}$  および  $M_{prdmd}$  をともに 0 とすればよい。これにより、第 35 発明とこれを必要要件とする発明との実施形態が構築されることとなる。この実施形態と第 35 発明などとの対応関係は、上記の第 4 実施形態に関する対応関係と同様である。

- 次に本発明の第 5 実施形態を説明する。前記第 3 実施形態の歩容の修正手法を説明する機能ブロック図（図 58）における点線で囲った部分  
15    ( $M_{rfdmd}$  決定処理部 219 及び  $M_{pfdmd}$  決定処理部 218 を除いた部分) は、上体水平位置安定化モーメント要求値  $M_{pfdmd}$ 、上体姿勢角安定化モーメント要求値  $M_{rfdmd}$ 、目標 ZMP、目標床反力鉛直成分、目標足平位置姿勢および目標腕姿勢などその他の部位の運動状態を入力  
20    として、補正目標上体鉛直位置、補正目標上体水平位置、補正目標上体姿勢角、(目標 ZMP まわりの) 補正目標床反力モーメント、および補正目標床反力水平成分を出力する順動力学フルモデルとなっている。そこで、これを擬似順動力学フルモデルと呼び、参照符号 222 を付する。この擬似順動力学フルモデル 222 (すなわち図 58 の点線で囲った部  
25    分) は、図 6.0 のような入出力関係を持った機能ブロックで表される。

      第 5 実施形態に係る装置の歩容補正手法は、第 1 ～ 第 4 実施形態で用



いた逆動力学フルモデル（逆フルモデル）201に代えて、上記擬似順動力学フルモデル222を順動力学フルモデルとして用いた、歩容の補正手法である。

図61は、この第5実施形態に係る装置の動作、具体的には、図13  
5 フローチャートのS038の歩容の修正手法を説明する機能ブロック図である。ここで、図61に示す単純化モデル223は、本実施形態における擬似順動力学フルモデル222に含む単純化モデル200とは別に備えた第2の単純化モデルである。この第2の単純化モデル223は、  
本実施形態でのその機能は、前述した単純化モデル200と同一であり、  
10 単に動力学モデルだけでなく、前述の図13のS010からS034の処理、すなわち単純化モデル歩容瞬時値の算出（決定）処理を表すものである。したがって、図61において、単純化モデル223以外の部分がS038の処理に相当する。なお、単純化モデル223は、実際上は、  
上体姿勢角の瞬時値と、上体水平位置の瞬時値とを決定できればよく、  
15 必ずしも図13のS010からS034の処理の全てを行なう必要はない。

第5実施形態では、S038の処理以外の構成は第1実施形態と同じであるので説明を省略し、以下に図61を用いてS038の処理を詳細に説明する。

20 第5実施形態においては、歩容生成装置100は、図61に示す如く、前記擬似順動力学フルモデル222と第2の単純化モデル223とを備え、第2の単純化モデル223を用いて生成される歩容と前記擬似順動力学フルモデル222を用いて算出される歩容との間の上体水平位置および上体姿勢角のそれぞれの差が演算部224、225により求められ  
25 る。そして、これらの差に応じて、これらの差が0に収束するようにPIDなどのフィードバック制御則によって上体水平位置安定化モーメン

- ト要求値  $M_{pfdmd}$  および上体姿勢角安定化モーメント要求値  $M_{rfdmd}$  が決定される。すなわち、単純化モデル 223 による上体水平位置と擬似順フルモデル 222 による上体水平位置との差に応じて、フィードバック制御則からなる上体水平位置安定化制御則 226 によって、
- 5  $M_{pfdmd}$  が求められる。また、単純化モデル 223 による上体姿勢角と擬似順フルモデル 222 による上体姿勢角との差に応じて、フィードバック制御則からなる上体姿勢角安定化制御則 227 によって、 $M_{rfdmd}$  が求められる。そして、この決定された  $M_{pfdmd}$  及び  $M_{rfdmd}$  は、前記擬似順動力学フルモデルにフィードバックされて入力
- 10 される。つまり、前記第 3 実施形態に係る図 58 で  $M_{pfdmd}$  決定処理部 218、 $M_{rfdmd}$  決定処理部 219 の出力の代わりに、それぞれ、上記上体水平位置安定化制御則 226 の出力 ( $M_{pfdmd}$ ) と、上体姿勢角安定化制御則 227 の出力 ( $M_{rfdmd}$ ) とが図 58 の点線で囲った部分により表される擬似順フルモデル 222 に入力される。
- 15 また、歩容生成装置 100 は、前記擬似順動力学フルモデル 222 への入力の一部である目標 ZMP、目標床反力鉛直成分、目標足平位置姿勢および目標腕姿勢などと、前記擬似順動力学フルモデルからの出力である補正目標上体鉛直位置、補正目標上体水平位置、補正目標上体姿勢角、補正目標床反力水平成分および補正目標床反力モーメントを最終的な今回歩容の目標瞬時値として出力する。
- 20

ここで、以上説明した第 5 実施形態と本発明との対応関係を説明しておく。第 5 実施形態は、前記した本願発明のうちの第 40 および第 41 発明に対応している。なお、第 5 実施形態は、前記第 42 発明にも対応しているが、これについては後述する。第 40、第 41 発明の許容範囲

25 設定手段には、図 13 のフローチャートの S030、S036 の処理が対応しており、並進床反力水平成分と ZMP (真の ZMP) とを制限対

象量として、それらの許容範囲が設定される。また、第40、第41発  
明の目標床反力仮瞬時値決定手段には、図13のフローチャートのS0  
32の処理のうちの一部（具体的には図37のS900やS902の処  
理、すなわち、目標床反力鉛直成分や目標ZMPの瞬時値算出処理）が  
5 対応している。また、第40、第42発明の第2モデル演算手段には、  
前述した図61の擬似順フルモデル222の演算処理、すなわち、前記  
第3実施形態で説明した図58の点線枠の部分の処理が対応している。  
また、第40、第42発明の第1モデル演算手段には、前述した図61  
の単純化モデル223の処理が対応している。これらのモデル222，  
10 223は、いずれも、上体姿勢角および上体水平位置を目標運動の仮瞬  
時値として出力する。なお、擬似順フルモデル222は、前記第3実施  
形態で説明した図58の点線枠の部分の処理を行なうものであるから、  
該擬似順フルモデル222が出力する床反力モーメントおよび床反力水  
平成分は、それらの許容範囲内のものとなる。また、第40、第41発  
15 明における操作量算出手段には、前述した図61の上体姿勢角安定化制  
御則227および上体水平位置安定化制御則226の処理が対応してお  
り、これらの制御則227，226により、上体姿勢角安定化モーメン  
ト要求値  $M_{rfdmd}$  および上体水平位置安定化モーメント  $M_{pfdmd}$  が床  
反力操作量として求められる。さらに、第40、第41発明におけるモ  
20 デル入力補正手段には、前記第5実施形態で、上記  $M_{rfdmd}$  および  
 $M_{pfdmd}$  が第2動力学モデルとしての擬似順フルモデル222に追加  
的に入力されることが対応している。このほか、第41発明におけるロ  
ボットの所定の部位には、ロボット1の上体24が対応している。

なお、前記第5実施形態では、 $M_{pfdmd}$  を求めるために上体水平位  
25 置を用いたが、擬似順フルモデル222と単純化モデル223とで、そ  
れぞれロボット1の重心位置を求めるようにし、それらの重心位置の差

から、その差を0に近づけるようにPI制御則等のフィードバック制御則により  $M_{pfdmd}$  を求めるようにしてもよい。また、第4実施形態で用いる床反力モーメントは、目標床反力鉛直成分を用いて適宜、ZMPに換算してもよいことは前記第1実施形態等の場合と同様である。

- 5 前記第5実施形態は、さらに本願の第42発明にも対応している。すなわち、第42発明は前記第3実施形態と対応する第26発明を必要要件とするものであり、この第42発明における第3モデル演算手段には、前述した図61の単純化モデル223の処理が対応している。そして、上体姿勢角安定化制御則227および上体水平位置安定化制御則226
- 10 によりそれぞれ求められる  $M_{rfdmd}$  および  $M_{pfdmd}$  が第42発明における要求値として用いられる。

- 前記第5実施形態以外にも、順動力学フルモデル（順フルモデル）を用いる手法は、本出願人が先に提案した特願2001-122621号に提示したごとく、多くの種類がある。これらそれぞれに対し、フルモデルを前記擬似順動力学フルモデルに置き換え、上体姿勢角を安定化する制御則を追加すれば、ZMP許容範囲と床反力水平成分許容範囲とを考慮したフルモデル補正手法にすることができる。
- 15

- すなわち、順動力学フルモデルを用いる手法をより一般的に言うならば、順動力学フルモデルと単純化モデルとを備え、前記単純化モデルを用いて生成される歩容と前記順動力学フルモデルとの間の上体水平位置およびまたは上体姿勢角の差を求める。そして、少なくともその求めたいずれかの差に応じて、この差が0に収束するように操作量を決定し、これを前記単純化モデルまたは前記順動力学フルモデルの少なくともい
- 20 ずれかにフィードバック（入力）し、前記順動力学フルモデルの入出力
- 25 を含む歩容を、補正歩容として生成する手法が順動力学フルモデルを用いる手法である。

前記擬似順フルモデル 2 2 2 には第 3 実施形態のフルモデル歩容生成装置（歩容補正手法）を用いる代わりに、その他の実施形態のいずれを用いても良い。ただし、摂動モデル 2 0 2, 2 0 3 を持つものの場合（第 1 実施形態や、第 2 実施形態、第 4 実施形態）、摂動モデル 2 0 2、  
5 2 0 3 の変位が過大になり過ぎる場合があるので、1 歩の歩容（今回歩容）の生成が完了する毎に摂動モデル 2 0 2, 2 0 3 の変位を単純化モデル 2 0 0 に加え、摂動モデル 2 0 2, 2 0 3 を初期化すれば良い。

また、前記操作量（上体水平位置安定化モーメント要求値  $M_{pfdmd}$  または、前記単純化モデル 2 0 0 にフィードバックする操作量）を決定  
10 する際には、上体水平位置の差ではなく、重心水平位置の差を基に決定しても良い。あるいは、上体水平位置の差と重心水平位置の差の両者を基に前記操作量を決定しても良い。

前述の単純化モデル歩容の生成処理に係わる定常歩容パラメータの決定、今回歩容パラメータの決定または今回歩容の瞬時値の生成のための  
15 ロボット 1 の動力学モデル（目標 ZMP など床反力に関する変数などを入力して、動力学平衡条件や床反力水平成分許容値などの制約条件を満足する上体位置・姿勢を生成する処理）として、前記擬似順動力学フルモデルを用いても良い。この場合、上体水平位置安定化モーメント要求値  $M_{pfdmd}$  は 0 にして置けば、目標 ZMP まわりのモーメントは 0  
20 になる。

このようにすると、探索手法を用いることなく、動力学平衡条件と制約条件を満足する歩容の各時刻における瞬時値を算出することが可能となるので、演算量を大幅に低減することができる。

床反力水平成分許容範囲と ZMP 許容範囲のいずれか一方を、無視あ  
25 るいは削除し（許容範囲と制限処理部 2 1 1 の処理とを省略する）、あるいは許容範囲を十分に大きく設定して実質上許容範囲を無視しても良

い。

また、許容範囲は床面の状況や歩容の形態に応じて設定を変えても良い。

例えば、滑り易い床面での歩行では、床反力水平成分許容範囲を狭く  
5 設定し、ZMP許容範囲を広く設定あるいは無視することより、滑り難い歩容が生成される。

また、階段歩行で踏みしろが少ない場合やつま先立ち歩行など接地面積が小さい歩行の場合には、床反力水平成分許容範囲を広く設定あるいは無視し、ZMP許容範囲を狭く設定することより、安定余裕が高い歩  
10 容が生成される。

走行の場合には、前述の実施形態のごとく、床反力水平成分許容範囲は床反力鉛直成分に応じて適切に設定される必要がある。

制限手段（制限処理部211）の詳細説明において、前述の各実施形態では、演算を簡素化するために、ZMP許容範囲を、前後方向（X軸  
15 方向）成分と左右方向（Y軸方向）成分とでそれぞれ独立に設定した例を示したが、前述したように支持多角形に応じて、ZMP許容範囲を前後方向（X軸方向）と左右方向の関係式で表した方が、より安定余裕の高い適切な歩容が生成される。例えば、次式のようにひとつまたは複数の不等式から成る連立不等式でZMP許容範囲を表しても良い。

20

$$a_{11} * \text{ZMPのX成分} + a_{12} * \text{ZMPのY成分} + a_{13} \geq 0$$

$$a_{21} * \text{ZMPのX成分} + a_{22} * \text{ZMPのY成分} + a_{23} \geq 0$$

…式300

ただし、 $a_{11}$ などは、定数

25 これに伴い、補正歩容の床反力モーメントの許容範囲も、式33の代わりに連立不等式で表現される。

また、前記実施形態では、演算を簡素化するために、床反力水平成分許容範囲も、前後方向（X 軸方向）成分と左右方向（Y 軸方向）成分とでそれぞれ独立に設定した例を示したが、これも前後方向と左右方向の関係式で表した方が、よりスリップし難い歩容が生成される。

5      例えば、次式のようにいわゆる摩擦円を許容範囲としても良い。

$$\begin{aligned} & (\text{床反力水平成分の X 成分}) * (\text{床反力水平成分の X 成分}) \\ & + (\text{床反力水平成分の Y 成分}) * (\text{床反力水平成分の Y 成分}) \\ & \leq (ka * \mu * Fz) * (ka * \mu * Fz) \end{aligned}$$

10

…式 301

ここで、Fz は目標床反力鉛直成分、 $\mu$  は摩擦係数、ka は 1 以下の正の定数を表す。

ただし、以上のように、ZMP 許容範囲や床反力水平成分許容範囲を  
15   前後方向と左右方向との関係式で表す場合、各許容範囲を同時にあるいは交互に満足するように、サジタルプレーン上での運動とラテラルプレーン上での運動を並列的に求める必要がある。

単純化モデル 200 を用いた歩容生成においては、床反力水平成分許容範囲を無視するか、あるいは床反力水平成分許容範囲を十分に大きく  
20   して、事実上、床反力水平成分許容範囲を無視できるようにして歩容を生成しても構わない。この場合、床反力水平成分許容範囲を越えないように上体姿勢角を変化させることが不必要になるので、生成される目標上体姿勢角は、基準上体姿勢角（目標上体姿勢角の収束目標）に常に一致させて置けば良い。こうすることにより、上体姿勢角の複雑な挙動は  
25   抑えられるので挙動予測が容易になり、単純化モデル 200 を用いた歩容の生成および継続的な安定性を保証した（発散しない）歩容のパラメ

一タを決定することが容易になる。このようにして生成された単純化モデル歩容は、動力学的平衡条件を十分に満足していない不安定な歩容であつたり、スリップしやすい歩容であるかもしれない。しかし、上記したごとく、フルモデル201又は222を用いて歩容を修正することにより、安定余裕が高くスリップしにくい歩容に修正されるので問題ない。

また、単純化モデル200は、床反力鉛直成分が小さい時に、目標ZMPを無視して、床反力水平成分許容範囲を重点的に満足するようにしても良い。たとえば、走行歩容の空中期では、目標ZMPまわりの床反力モーメントを無視して、単に全体重心水平加速度が0になるように歩容を生成しても良い。このようにして生成された単純化モデル歩容でも、前述の各実施形態の如く、フルモデル201又は222を用いて歩容を修正することにより、安定余裕が高くスリップしにくい歩容に修正することができるので問題ない。

上体水平位置補正用摂動モデル202においては、両脚体2, 2に作用する重力と慣性力との合力の並進力鉛直成分を、両脚体2, 2に作用する慣性力を無視して、両脚体2, 2に作用する重力で近似しても良い。

上体水平位置補正用摂動モデル202の上体質点は、前述の実施形態では、上体床反力鉛直成分  $F_{bz}$  に応じた鉛直方向運動を行うものとしたが、上体質点の鉛直方向運動を無視し、上体質点の鉛直位置が一定高さであると近似しても良い。走行においては、通常、上体位置と床との距離（鉛直方向距離）の変動は10パーセント以下であるからである。ただし、この場合でも、上体水平位置補正用摂動モデル202の上体質点には、上体床反力鉛直成分  $F_{bz}$  に釣り合う仮想的な鉛直方向の拘束力が作用するものとして、上体水平位置補正量摂動モデル202の挙動を決定するのが望ましい。

前述の実施形態における単純化モデル歩容の生成処理においては、上



体姿勢角を初期値に戻すための上体姿勢角加速度を発生させる上体姿勢復元モーメントのZMP換算値である上体姿勢復元モーメントZMP換算値ZMP<sub>rec</sub>を生成していたが、上体姿勢角補正用摂動モデル制御則としてこのモーメントを算出するアルゴリズムを用い、算出されたモーメントを上体姿勢角安定化モーメント要求値Mrfdmdとしても良い。

補足すると、上体姿勢復元モーメント、あるいは、上体姿勢復元モーメントZMP換算値（ZMP<sub>rec</sub>）は、床反力水平成分許容範囲、ZMP許容範囲（床反力モーメント許容範囲）が十分に大きい時に、前述したような台形状パターンなど、あらかじめ関数構造を決めたパターン（時間関数）で発生される。したがって、制限手段において制限が加わることがなく、そのまま、上体姿勢角補正用摂動モデル安定化モーメントMrf（上体姿勢角安定化モーメントMrf）となって、単純化モデルの上体姿勢角加速度を変化させるように作用する。しかも、通常の線形フィードバックのように収束に無限時間かからないと共に、適切なZMP<sub>rec</sub>のパターンを発生させることで、上体姿勢角を基準あるいは目標上体姿勢角に有限時間で整定させることもできる。

上体水平位置補正用摂動モデル制御則も、前述の単純化モデル歩容の生成処理における上体姿勢復元モーメントの決定法のごとく、床反力水平成分許容範囲、ZMP許容範囲（床反力モーメント許容範囲）が十分に大きい時に、上体水平位置安定化モーメント要求値Mpfdmdを、台形状パターンなど、あらかじめ関数構造を決めたパターン（時間関数）で発生するようにしても良い。したがって、制限手段において制限が加わることがなく、そのまま、上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメントMpf（上体水平位置安定化モーメントMpf）となって、単純化モデル200の上体水平加速度を変化させるように作用する。

歩容の補正に用いられる積分演算（ブロック図における積分器）の代

わりに、P I 制御などの他のフィードバック制御則を用いても良い。

例えば、フルモデル床反力モーメント誤差  $M_{err}$  を 0 に収束させるための制御則には、前記積分器 2 1 7 a の代わりに、P I 制御などの他の制御則を用いても良い。

5 同様に、例えば、制限補正目標床反力水平成分  $F_{ltd}$  からフルモデル床反力水平成分  $F_{full}$  を減じた値を入力して上体並進モード床反力比率  $h$  の逆数と上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント  $M_{pf}$  の積を出力する制御則には、積分器 2 1 5 a の代わりに、P I 制御などの他の制御則を用いても良い。

10 前記実施形態に用いられるゲイン、例えば前記積分器 2 1 7 a のゲイン  $K_m$ 、積分器 2 1 5 a のゲイン  $K_c$ 、あるいは上体水平位置補正用摂動モデル制御則 2 0 6 などのフィードバック制御則のゲインは、一定値でなくても良い。例えば、床反力水平成分許容範囲、ZMP 許容範囲、歩容の時期などに応じて、それらのゲインを変更するようにしてもよい。

15 上体並進モード床反力比率  $h$  が、式 a 1 4 のように解析的に求めることができない場合には、式 a 7 に示す定義に戻って、動力学モデルにおいて上体水平位置  $X_b$  の加速度を微小量だけ摂動させてみて、床反力モーメント  $M_y$  と床反力水平成分  $F_x$  の摂動の比を求め、この比をもって上体並進モード床反力比率  $h$  としても良い。

20 または、精度は若干低下するが、あらかじめ標準的な歩容における上体並進モード床反力比率  $h$  値の平均値を求めておいて、それを用いても良い。

前記制限手段（制限処理部 2 1 1）では、無制限時補正目標床反力モーメント  $M_{in}$  が床反力モーメント許容範囲内に存在していないか、あ  
25 るいは、無制限時補正目標床反力水平成分  $F_{in}$  が床反力水平成分許容範囲内に存在していない場合、 $F_{ltd}$  と  $M_{ltd}$  は、式 3 5、式 3 6、式 3

7、式38、式41を満足するように決定しつつ、 $\Delta M_{p2}$ の絶対値が最小となるように決定し、また、これらの条件を満足した上で、 $\Delta F$ の絶対値ができる限り小さくなるように決定したが、式41の代わりに式111を用いても良い。ただし、 $c$ は所定の値である。

5

$$\Delta M = \Delta F * c + \Delta M_{p2} \quad \cdots \text{式111}$$

$c$ を上体並進モード床反力比率 $h$ より大きくすればするほど、前記補正用摂動モデル上体水平位置が前記補正用摂動モデル上体姿勢角よりも優先的に安定化される。

10

前記第2、第3、第4実施形態においては、フルモデル床反力モーメント $M_{full}$ と制限補正目標床反力モーメント $M_{ltd}$ は前述のごとくほぼ一致するので、フルモデル床反力モーメント $M_{full}$ の代わりに制限補正目標床反力モーメント $M_{ltd}$ を補正目標床反力モーメントとして出力しても良い。

15

また、フルモデル床反力水平成分 $F_{full}$ と制限補正目標床反力水平成分 $F_{ltd}$ は前述のごとくほぼ一致するので、フルモデル床反力水平成分 $F_{full}$ の代わりに制限補正目標床反力水平成分 $F_{ltd}$ を補正目標床反力水平成分として出力しても良い

20

また、前記第1～第4実施形態では、単純化モデル200を用いて逆フルモデル201に入力する歩容瞬時値を生成して、歩容の修正を行なう例を示したが、テーブル化された歩容をフルモデルに入力して、歩容の修正を行なうようにしてもよい。

25

制限手段（制限処理部211）における、補正用摂動モデル安定化モーメント要求値（上体水平位置安定化モーメント要求値） $M_{pfdmd}$ 、フルモデル床反力水平成分 $F_{full}$ 、上体水平位置補正用摂動モデル安定化

モーメント（上体水平位置安定化モーメント） $M_{pf}$ 、フルモデル床反力水平成分  $F_{full}$  と制限補正目標床反力水平成分  $F_{ltd}$  などから無制限時補正目標床反力水平成分  $F_{in}$  および上体水平位置補正用摂動モデル安定化モーメント（上体水平位置安定化モーメント） $M_{pf}$  を算出する方法としては、本願出願人が2002年12月24付けで出願したPCT特許出願（名称：「制御システム」、内容は制限機能に関するもの）にて提案しているバイアス推定値を推定する手法を用いても良い。この手法と本実施例の制限手段での方法は、同PCT特許出願に示すごとく近似的に等価変換できる。

- 10 目標床反力鉛直成分を満足する目標全体重心鉛直位置とフルモデル歩容の全体重心鉛直位置（フルモデル全体重心鉛直位置）との差に基づいて、この差が0に収束するように、補正目標上体鉛直位置を決定しても良い。

- この手法による補正目標上体鉛直位置決定処理を表す機能ブロック図を図62に示す。この図62を用いて、その処理を説明すると、補正歩容の瞬時値を基に、フルモデルを用いて全体重心鉛直位置（以降、フルモデル全体重心鉛直位置と呼ぶ）が求められる。さらに、目標床反力鉛直成分を満足する目標全体重心鉛直位置と前記求めたフルモデル全体重心鉛直位置との差（フルモデル全体重心鉛直位置差）に所定のゲイン  $K_{gz}$  を乗じた値が積分され、高さ補正值が算出される。そして、単純化モデルを用いて決定した上体鉛直位置に所定のフィードフォワードゲイン  $K_{ffgz}$  を乗じた値と、上記高さ補正值とを加えた高さがフルモデル上体鉛直位置（すなわち補正目標上体鉛直位置）として求められる。

- フィードフォワードゲイン  $K_{ffgz}$  は、0から1までの間の所定の値である。フィードフォワードゲイン  $K_{ffgz}$  を0にする、すなわち、単純化モデル歩容上体鉛直位置を考慮せずに、補正目標上体鉛直位置を決定し

ても良い。この場合には、高さ補正值と補正目標上体鉛直位置とは一致する。

尚、床反力鉛直成分は、ロボット1の全体重心鉛直加速度と重力加速度との和に比例するので、歩容パラメータとして、床反力鉛直成分軌道の代わりにロボット1の全体重心鉛直加速度軌道に関するパラメータを明示的に設定しても構わない。本質的に同じことである。さらに、床反力鉛直成分軌道の代わりに、ロボット1の全体重心軌道に近い挙動をする部位の鉛直加速度軌道に関するパラメータを明示的に設定しても構わない。例えば、脚体2, 2の質量が上体24の質量に比べ十分に小さい場合には、上体鉛直加速度軌道とロボット1の全体重心鉛直加速度軌道は、ほぼ同じか比例関係になるので、床反力鉛直成分軌道の代わりに上体鉛直加速度軌道を用いても良い。

同様に、床反力水平成分とロボット全体重心水平加速度は、比例関係にあるので、前記実施形態における床反力水平成分およびその許容範囲の代わりに、ロボット全体重心水平加速度およびその許容範囲を用いても構わない。また、ロボット全体重心水平軌道に近い挙動をする部位の水平加速度軌道に関するパラメータを明示的に設定しても構わない。例えば、脚体2, 2の質量が上体24の質量に比べ十分に小さい場合には、上体水平加速度軌道とロボット1の全体重心水平加速度軌道は、ほぼ同じか比例関係にあるので、床反力水平成分およびその許容範囲の代わりに上体水平加速度およびその許容範囲を用いても良い。

さらに、斜面移動時（傾斜した床面でロボット1を移動させるとき）の歩容生成においては、床反力水平成分許容範囲や全体重心加速度水平成分の許容範囲の代わりに、並進床反力の床面平行成分（床面に平行な成分）、すなわち摩擦力の許容範囲、あるいは全体重心加速度の床面平行成分（これは重力成分を除けば摩擦力に比例する）の許容範囲を設定

するようにしてもよい。例えば、並進床反力の床面平行成分（摩擦力）の許容範囲を設定する場合に関して説明（この説明は全体重心加速度の床面平行成分の許容範囲を設定する場合でも同様である）すると、該摩擦力は、床面の水平面に対する傾斜角度を $\theta f$ （ロボット1の進行方向  
5 に向かって前下がり斜面の場合を正とする）とすると、次式 c 7 2 の関係が成立する。従って、前記実施形態と同様のアルゴリズムに歩容を生成する場合、この式 c 7 2 の関係を用いて、摩擦力許容範囲を床反力水平成分許容範囲に変換することで、該床反力水平成分許容範囲を設定するようにすればよい。なお、この場合、式 c 7 2 の床反力鉛直成分には、  
10 目標床反力鉛直成分を用いればよい。

$$\text{摩擦力} = \text{床反力水平成分} \cdot \cos(\theta f) - \text{床反力鉛直成分} \cdot \sin(\theta f)$$

…式 c 7 2

15 床反力水平成分と目標 Z M P まわりの床反力モーメントとを適切な値にするために、前記の実施形態では、上体回転モードと上体並進モードとの2つの運動モードを用いたが、これら以外の運動モードを用いても良い。

例えば、図 6 3 のように、ロボット1の股関節を中心に上体姿勢を回  
20 転させると、全体重心まわりの角運動量に変化すると共に全体重心も変化する。この運動と前記上体並進モードとをある所定の割合で重ね合わせると（合成すると）、前記上体回転モードとほとんど同じ運動になり、床反力水平成分が発生しなくなる。したがって、これを改めて前記上体  
25 回転モードとみなせば、前記実施形態のアルゴリズムにしたがって、同様の歩容を生成することができる。

したがって、運動モードのひとつが床反力水平成分を発生しない運動

モードである必要もない。いかなるモードの組み合わせであっても、床反力水平成分と目標ZMPまわりの床反力モーメントの発生の割合が異なる2つの運動モードを用いさえすれば、上記例のように、任意の床反力水平成分と目標ZMPまわりの床反力モーメントとを発生させることができるからである。

また、上体姿勢以外の運動モードを用いても良い。ただし、なるべく小さい変位で大きな床反力水平成分または目標ZMPまわりの床反力モーメントが発生できる運動モードを選ぶべきである。

例えば、左右の腕を同一回転方向に振りまわす運動モード、接地していない（空中に存在する）足平の位置を摂動させる運動モードでも良い。ただし、遊脚軌道を摂動させる場合には、着地位置が変わらないように着地直前までには、摂動量を実質的に0に戻すべきである。

また、3つ以上の運動モードを用いても良い。

また、選んだモードのうちの少なくとも2つは、床反力水平成分と目標ZMPまわりの床反力モーメントとの発生比率が、互いに異なるものである必要がある。そうでないと、一般的に連立方程式の解がなくなるからである。

さらにできる限り、床反力水平成分をあまり変化させないで目標ZMPまわりの床反力モーメントを十分に大きく変化させることができる運動モードと、目標ZMPまわりの床反力モーメントをあまり変化させないで床反力水平成分を十分に大きく変化させることができる運動モードとを組み合わせることが望ましい。

言いかえると、全体重心をあまり変化させないで角運動量を十分に大きく変化させることができる運動モードと、角運動量をあまり変化させないで全体重心を十分に大きく変化させることができる運動モードとを組み合わせることが望ましい。運動モードの変位が小さくなるからであ

る。

前記単純化モデルとして、前記実施形態に用いた動力学モデル以外にも以下のモデルを用いても良い。

- 1) 図12に示したように複数のリンクに質点を設定した非線形なモデル (多質点モデル)
- 2) 本願出願人による特願2000-352011号に示された3質点モデル
- 3) 上体にのみ質量がある1質点モデル
- 4) 全体重心まわりの角運動量変化によって生じる慣性力のモーメントを無視したモデル
- 5) 重力と慣性力との合力 (または床反力) と上体並進運動との関係を表す部分モデルと、上記合力と上体回転運動の関係を表す部分モデルを分離して持つ分離型モデル。例えば、図11に示す質点は、上記合力と上体並進運動との関係を表す部分モデルであり、図11に示すフライホイールは、上記合力と上体回転運動との関係を表す部分モデルである。

尚、フルモデルは、基本的には、単純化モデルよりもより近似精度の高い動力学モデルを用いることが好ましいが、単純化モデルと同等の近似精度の動力学モデルを用いてもよい。

- また、特に、単純化モデル歩容の生成における各処理で用いられるモデルは同一でも良いし、処理に応じて適宜、モデルを使い分けても良い。例えば、前記定常歩容は今回歩容の終端状態を決定するためだけに生成されるものであるので、その定常歩容の動力学的な精度に対する要求は、今回歩容に比べて小さい。そこで、例えば、今回歩容の生成処理では、図11の単純化モデル (3質点+フライホイールのモデル) を用いる一方、定常歩容の生成処理 (特に図22のS408、S412) では、各脚体2の質量を無視し、上体24に対応する上体質点24mと、フライ



ホール FH とで構成される動力学モデル（図 1 1 のモデルで脚質点 2 m, 2 m を除去した 1 質点 + フライホイールのモデル）を用いて定常歩容を生成するようにしてもよい。この場合の定常歩容の生成処理では、前記実施形態において、脚質点 2 m の質量を 0 として前記図 2 2 の S 4 0 8、  
5 S 4 1 2 の処理を行なうようにすればよい。このようにすると、定常歩容の生成処理における演算量を大幅に削減できる。

尚、前述した各実施形態において、ブロック線図、フローチャート、およびアルゴリズムなどは、演算処理順序を変えるなどの等価変形をしても良い。また、適宜ローパスフィルタを挿入しても良い。

10 また、前記各実施形態を 2 足移動ロボットに関して説明してきたが、3 足以上の多脚ロボットにも本発明を適応することができる。

#### 産業上の利用可能性

15 以上のように本発明は 2 足移動ロボット等の脚式移動ロボットを、様々な歩容形態で円滑に移動させることが可能な歩容を生成することができるものとして有用である。

## 請 求 の 範 囲

1. 上体から延設された複数の脚体を運動させて移動する脚式移動ロボットの目標歩容を生成する歩容生成装置において、

5 前記ロボットに作用する並進床反力水平成分又は並進床反力の床面平行成分又は該ロボットの全体重心加速度水平成分又は全体重心加速度の床面平行成分と、床反力モーメント又はZMPとのうちの少なくともいずれかを制限対象量とし、該制限対象量の許容範囲を設定する許容範囲設定手段と、

10 前記目標歩容を構成する目標運動及び目標床反力の仮瞬時値を決定する仮瞬時値決定手段と、

少なくとも前記目標運動の仮瞬時値を、前記ロボットの運動と床反力との関係を表す動力学モデルに入力し、該動力学モデルの出力としてのモデル床反力瞬時値を求めるモデル演算手段と、

15 少なくとも該モデル床反力瞬時値と前記目標床反力の仮瞬時値との差と、前記許容範囲とに基づき、前記目標運動の仮瞬時値を補正して目標運動の目標瞬時値を決定する目標瞬時値決定手段とを備え、

20 該目標瞬時値決定手段は、前記目標運動の目標瞬時値によって発生するロボットの慣性力と重力との合力に前記動力学モデル上で略釣り合う床反力の瞬時値に対応する前記制限対象量が前記許容範囲内に収まるように前記目標運動の仮瞬時値を補正することを特徴とする脚式移動ロボットの歩容生成装置。

2. 前記モデル演算手段が求めるモデル床反力瞬時値は少なくとも床反力モーメント又はZMPのモデル値を含むと共に、前記仮瞬時値決定手段が決定する前記目標床反力の仮瞬時値は少なくとも床反力モーメント又はZMPの仮目標瞬時値を含み、前記目標瞬時値決定手段が用いる前記差は、前記床反力モーメント又はZMPのモデル値と、該床反力モー

25

メント又はZMPの仮目標瞬時値との差であることを特徴とする請求の範囲第1項に記載の脚式移動ロボットの歩容生成装置。

3. 前記目標瞬時値決定手段は、前記目標運動の目標瞬時値によって発生するロボットの慣性力と重力との合力に前記動力学モデル上で略釣り合う床反力の瞬時値を目標床反力の目標瞬時値として決定することを特徴とする請求の範囲第1項に記載の脚式移動ロボットの歩容生成装置。

4. 前記目標瞬時値決定手段は、前記ロボットの振動運動と振動床反力との関係を表す振動モデルと、

少なくとも前記差と前記許容範囲とに基づき前記振動モデルの振動床反力を操作する振動モデル操作量を決定する手段と、

その決定した振動モデル操作量を前記振動モデルに入力することにより前記目標運動の補正量を求める手段と、

該補正量により前記目標運動の仮瞬時値を補正することにより前記目標運動の目標瞬時値を決定する手段とを備えることを特徴とする請求の範囲第1項に記載の脚式移動ロボットの歩容生成装置。

5. 少なくとも前記振動モデルの状態量に応じて前記振動モデル操作量の要求値を決定する手段を備え、前記振動モデル操作量を決定する手段は、前記差、前記許容範囲、及び前記要求値に基づき前記振動モデルに入力する振動モデル操作量を決定することを特徴とする請求の範囲第4項に記載の脚式移動ロボットの歩容生成装置。

6. 前記振動モデル操作量の要求値を前記振動モデルの状態量と該状態量に対する目標値との偏差に応じたフィードバック制御則により逐次決定する手段を備えたことを特徴とする請求の範囲第5項に記載の脚式移動ロボットの歩容生成装置。

7. 前記振動モデルは、前記振動運動に対する並進床反力水平成分と床反力モーメントとの振動比率が互いに異なる複数の振動運動を含むモデ

ルであり、前記摂動モデル操作量は、各摂動運動にそれぞれ対応する複数の操作量からなると共に、前記目標運動の補正量は、各摂動運動にそれぞれ対応する複数の補正量からなることを特徴とする請求の範囲第4項に記載の脚式移動ロボットの歩容生成装置。

5 8. 前記複数の摂動運動は、前記ロボットの上体の並進運動と、該ロボットの重心を略一定に維持しつつロボットの所定部位の姿勢を変化させる姿勢変化運動とからなることを特徴とする請求の範囲第7項に記載の脚式移動ロボットの歩容生成装置。

10 9. 前記複数の摂動運動は、前記ロボットの上体の並進水平運動と、該ロボットの上体の姿勢変化運動とからなることを特徴とする請求の範囲第7項に記載の脚式移動ロボットの歩容生成装置。

15 10. 前記制限対象量は、前記ロボットに作用する並進床反力水平成分又は並進床反力の床面平行成分又は該ロボットの全体重心加速度水平成分又は全体重心加速度の床面平行成分と、床反力モーメント又はZMPとからなることを特徴とする請求の範囲第7項に記載の脚式移動ロボットの歩容生成装置。

11. 前記摂動モデル操作量は、少なくとも前記差に応じて決定される第1操作量成分と、少なくとも前記許容範囲に基づき決定される第2操作量成分とを含み、

20 前記摂動モデル操作量を決定する手段は、前記第1操作量成分のみを前記摂動モデルに入力したと仮定した場合に決定される目標運動の目標瞬時値に対応する前記制限対象量の推定値を求める手段と、

その求めた制限対象量の推定値を前記許容範囲と比較し、その比較に基づき該許容範囲内に制限してなる制限済制限対象量を決定する手段と、

25 少なくとも該制限済制限対象量に基づき前記第2操作量成分を決定する手段とを備えることを特徴とする請求の範囲第4項に記載の脚式移動

ロボットの歩容生成装置。

1 2. 前記摂動モデル操作量は、少なくとも前記差に応じて決定される第 1 操作量成分と、少なくとも前記要求値及び前記許容範囲に基づき決定される第 2 操作量成分とを含み、

- 5 前記摂動モデル操作量を決定する手段は、前記第 2 操作量成分を前記要求値に一致させて前記第 1 操作量成分と共に前記摂動モデルに入力したと仮定した場合に決定される目標運動の目標瞬時値に対応する前記制限対象量の推定値を求める手段と、

- 10 その求めた制限対象量の推定値を前記許容範囲と比較し、その比較に基づき該許容範囲内に制限してなる制限済制限対象量を決定する手段と、  
少なくとも該制限済制限対象量に基づき前記第 2 操作量成分を決定する手段とを備えることを特徴とする請求の範囲第 5 項に記載の脚式移動ロボットの歩容生成装置。

- 1 3. 前記制限対象量は、前記並進床反力水平成分又は並進床反力の床面平行成分又は該ロボットの全体重心加速度水平成分又は全体重心加速度の床面平行成分を含んでおり、
- 15

- 前記摂動モデル操作量を決定する手段は、前記制限対象量の推定値を求めるために前記モデル床反力瞬時値として前記動力学モデルにより求められる並進床反力水平成分の瞬時値又は並進床反力の床面平行成分の瞬時値を用いることを特徴とする請求の範囲第 1 1 項又は第 1 2 項に記載の脚式移動ロボットの歩容生成装置。
- 20

- 1 4. 前記摂動モデルは、前記ロボットの上体の並進運動と、該ロボットの上体の姿勢変化運動とを含むモデルであると共に、前記制限対象量は、前記ロボットに作用する並進床反力水平成分又は並進床反力の床面平行成分又は該ロボットの全体重心加速度水平成分又は全体重心加速度の床面平行成分と、床反力モーメント又は Z M P とからなり、
- 25

前記制限済制限対象量を決定する手段は、前記第 2 操作量成分のうち、前記上体の姿勢変化運動に対応する操作量成分の前記要求値からの変化が最小になり、且つ、各制限済制限対象量の前記推定値からの変化が最小になるように各制限済制限対象量を決定することを特徴とする請求の  
5 範囲第 1 2 項に記載の脚式移動ロボットの歩容生成装置。

1 5. 前記目標瞬時値決定手段は、前記制限済制限対象量に対応する床反力を前記目標床反力の目標瞬時値として決定することを特徴とする請求の範囲第 1 1 項又は第 1 2 項に記載の脚式移動ロボットの歩容生成装置。

10 1 6. 前記目標瞬時値決定手段は、前記目標運動の仮瞬時値を補正するための補正量を前記動力学モデルに追加的に入力する手段と、

前記モデル床反力瞬時値に対応する前記制限対象量が前記許容範囲内の値に略維持され、且つ前記差が安定するように前記補正量を決定する手段とを備えることを特徴とする請求の範囲第 1 項に記載の脚式移動ロボット  
15 の歩容生成装置。

1 7. 前記目標瞬時値決定手段は、前記目標運動の補正量を、前記動力学モデルに追加的に入力する手段を備えると共に、前記摂動モデル操作量は、少なくとも前記差に応じて決定される第 1 操作量成分と、少なくとも前記許容範囲に基づき決定される第 2 操作量成分とを含み、

20 前記摂動モデル操作量を決定する手段は、前記第 1 操作量成分のみを前記摂動モデルに入力したと仮定した場合に前記動力学モデルが出力するモデル床反力瞬時値に対応する前記制限対象量の推定値を求める手段と、

その求めた制限対象量の推定値を前記許容範囲と比較し、その比較に基づき該許容範囲内に制限してなる制限済制限対象量を決定する手段と、  
25 少なくとも該制限済制限対象量に基づき前記第 2 操作量成分を決定す

る手段とを備えることを特徴とする請求の範囲第4項に記載の脚式移動ロボットの歩容生成装置。

18. 前記目標瞬時値決定手段は、前記目標運動の補正量を、前記動力学モデルに追加的に入力する手段を備えると共に、前記摂動モデル操作量は、少なくとも前記差に応じて決定される第1操作量成分と、少なくとも前記要求値及び許容範囲に基づき決定される第2操作量成分とを含み、

前記摂動モデル操作量を決定する手段は、前記第2操作量成分を前記要求値に一致させて前記第1操作量と共に前記摂動モデルに入力したと仮定した場合に前記動力学モデルが出力するモデル床反力瞬時値に対応する前記制限対象量の推定値を求める手段と、

その求めた制限対象量の推定値を前記許容範囲と比較し、その比較に基づき該許容範囲内に制限してなる制限済制限対象量を決定する手段と、

少なくとも該制限済制御対象量に基づき前記第2操作量成分を決定する手段とを備えることを特徴とする請求の範囲第5項に記載の脚式移動ロボットの歩容生成装置。

19. 前記第2操作量成分は前記床反力モーメント又はZMPを含むと共に、前記差は少なくとも該床反力モーメント又はZMPに係わる差を含み、

20. 前記摂動モデル操作量を決定する手段は、前記差のうちの床反力モーメント又はZMPと、前記第2操作量成分の床反力モーメント又はZMPとが略等しくなるように前記第1操作量成分を決定する手段を備えることを特徴とする請求の範囲第17項又は第18項に記載の脚式移動ロボットの歩容生成装置。

20. 前記制限対象量は、前記並進床反力水平成分又は並進床反力の床面平行成分又は該ロボットの全体重心加速度水平成分又は全体重心加速

度の床面平行成分を含んでおり、

前記摂動モデル操作量を決定する手段は、前記制限対象量の推定値を求めるために前記モデル床反力瞬時値として前記動力学モデルにより求められる並進床反力水平成分の瞬時値又は並進床反力の床面平行成分の瞬時値を用いることを特徴とする請求の範囲第 1 7 項又は第 1 8 項に記載の脚式移動ロボットの歩容生成装置。

2 1. 前記摂動モデルは、前記ロボットの上体の並進運動と、該ロボットの上体の姿勢変化運動とを含むモデルであると共に、前記制限対象量は、前記ロボットに作用する並進床反力水平成分又は並進床反力の床面平行成分又は該ロボットの全体重心加速度水平成分又は全体重心加速度の床面平行成分と、床反力モーメント又は Z M P とからなり、

前記制限済制限対象量を決定する手段は、前記第 2 操作量成分のうち、前記上体の姿勢変化運動に対応する操作量成分の前記要求値からの変化が最小になり、且つ、各制限済制限対象量の前記推定値からの変化が最小になるように各制限済制限対象量を決定することを特徴とする請求の範囲第 1 8 項に記載の脚式移動ロボットの歩容生成装置。

2 2. 前記目標瞬時値決定手段は、前記モデル床反力瞬時値を前記目標床反力の目標瞬時値として決定することを特徴とする請求の範囲第 1 6 項に記載の脚式移動ロボットの歩容生成装置。

2 3. 上体から延設された複数の脚体を運動させて移動する脚式移動ロボットの目標歩容を生成する歩容生成装置において、

前記ロボットに作用する並進床反力水平成分又は並進床反力の床面平行成分又は該ロボットの全体重心加速度水平成分又は全体重心加速度の床面平行成分と、床反力モーメント又は Z M P とのうちの少なくともいずれかを制限対象量とし、該制限対象量の許容範囲を設定する許容範囲設定手段と、



前記目標歩容を構成する目標運動及び目標床反力のうちの少なくとも目標床反力の仮瞬時値を逐次決定する目標床反力仮瞬時値決定手段と、

少なくとも該目標床反力の仮瞬時値を、前記ロボットの運動と床反力との関係を表す第 1 動力学モデルに入力し、該第 1 動力学モデルの出力  
5 としての目標運動の仮瞬時値を求める第 1 モデル演算手段と、

少なくとも前記目標運動の仮瞬時値を、前記ロボットの運動と床反力との関係を表す第 2 動力学モデルに入力し、該第 2 動力学モデルの出力としてのモデル床反力瞬時値を求める第 2 モデル演算手段と、

少なくとも該モデル床反力瞬時値と前記目標床反力の仮瞬時値との差  
10 と、前記許容範囲とに基づき、前記第 2 動力学モデルが出力する前記モデル床反力瞬時値に対応する前記制限対象量が前記許容範囲内に収まるように前記目標床反力の補正量を求め、その求めた補正量を前記第 1 動力学モデルに追加的に入力する第 1 モデル入力補正手段とを備え、

少なくとも前記第 2 動力学モデルの入力に基づいて前記目標運動の目標瞬時値を決定することを特徴とする脚式移動ロボットの歩容生成装置。  
15

2 4. 前記第 2 モデル演算手段が求めるモデル床反力瞬時値は少なくとも床反力モーメント又は Z M P のモデル値を含むと共に、前記仮瞬時値決定手段が決定する前記目標床反力の仮瞬時値は少なくとも床反力モーメント又は Z M P の仮目標瞬時値を含み、前記第 1 モデル入力補正手段  
20 が用いる前記差は、前記床反力モーメント又は Z M P のモデル値と、該床反力モーメント又は Z M P の仮目標瞬時値との差であることを特徴とする請求の範囲第 2 3 項に記載の脚式移動ロボットの歩容生成装置。

2 5. 前記目標瞬時値決定手段は、前記第 2 動力学モデルが出力する前記モデル床反力瞬時値を前記目標床反力の目標瞬時値として決定することを特徴とする請求の範囲第 2 3 項に記載の脚式移動ロボットの歩容生成装置。  
25

2 6 . 前記目標床反力の補正量の要求値を決定する手段を備え、

前記第 1 モデル入力補正手段が求める前記目標床反力の補正量は、少なくとも前記差に応じて決定される第 1 補正量成分と、少なくとも前記要求値及び許容範囲に基づき決定される第 2 補正量成分とを含み、

- 5 前記第 1 モデル入力補正手段は、前記第 2 補正量成分を前記要求値に一致させて前記第 1 補正量成分と共に前記第 1 動力学モデルに追加的に入力したと仮定した場合に前記第 2 動力学モデルが出力するモデル床反力瞬時値に対応する前記制限対象量の推定値を求める手段と、

- 10 その求めた制限対象量の推定値を前記許容範囲と比較し、その比較に基づき該許容範囲に制限してなる制限済制限対象量を決定する手段と、

少なくとも該制限済制限対象量に基づき前記第 2 補正量成分を決定する手段とを備えることを特徴とする請求の範囲第 2 3 項に記載の脚式移動ロボットの歩容生成装置。

- 15 2 7 . 少なくとも前記差と前記許容範囲とに基づき前記目標運動の補正量を求め、その求めた補正量を前記第 2 動力学モデルに追加的に入力する第 2 モデル入力補正手段を備えたことを特徴とする請求の範囲第 2 3 項に記載の脚式移動ロボットの歩容生成装置。

2 8 . 前記ロボットの摂動運動と摂動床反力との関係を表す摂動モデルと、

- 20 少なくとも前記差と前記許容範囲とに基づき床反力操作量を決定する手段と、

その決定した床反力操作量を、前記第 1 動力学モデルに入力する前記目標床反力の補正量と前記摂動モデルに入力する摂動モデル操作量とに分配する分配手段とを備え、

- 25 前記第 2 モデル入力補正手段は、前記摂動モデル操作量を前記摂動モデルに入力することにより前記目標運動の補正量を求めることを特徴と

する請求の範囲第 2 7 項に記載の脚式移動ロボットの歩容生成装置。

2 9. 少なくとも前記摂動モデルの状態量に応じて前記床反力操作量の要求値を決定する手段を備え、前記床反力操作量を決定する手段は、前記差、前記許容範囲、及び前記要求値に基づき前記分配手段に与える床反力操作量を決定することを特徴とする請求の範囲第 2 8 項に記載の脚式移動ロボットの歩容生成装置。

3 0. 前記床反力操作量の要求値を前記摂動モデルの状態量と該状態量に対する目標値との偏差に応じたフィードバック制御則により逐次決定する手段を備えたことを特徴とする請求の範囲第 2 9 項に記載の脚式移動ロボットの歩容生成装置。

3 1. 前記摂動モデルは、前記摂動運動に対する並進床反力水平成分と床反力モーメントとの摂動比率が互いに異なる複数の摂動運動を含むモデルであり、前記床反力操作量は各摂動運動にそれぞれ対応する複数の操作量からなると共に、前記第 2 モデル入力補正手段が求める前記目標運動の補正量は、各摂動運動にそれぞれ対応する複数の補正量からなることを特徴とする請求の範囲第 2 8 項に記載の脚式移動ロボットの歩容生成装置。

3 2. 前記複数の摂動運動は、前記ロボットの上体の並進運動と、該ロボットの重心を略一定に維持しつつロボットの所定の部位の姿勢を変化させる姿勢変化運動とからなることを特徴とする請求の範囲第 3 1 項に記載の脚式移動ロボットの歩容生成装置。

3 3. 前記複数の摂動運動は、前記ロボットの上体の並進水平運動と、該ロボットの上体の姿勢変化運動とからなることを特徴とする請求の範囲第 3 1 項に記載の脚式移動ロボットの歩容生成装置。

3 4. 前記制限対象量は、前記ロボットに作用する並進床反力水平成分又は並進床反力の床面平行成分又は該ロボットの全体重心加速度水平成

分又は全体重心加速度の床面平行成分と、床反力モーメント又はZMPとからなることを特徴とする請求の範囲第31項に記載の脚式移動ロボットの歩容生成装置。

35. 前記床反力操作量は、少なくとも前記差に応じて決定される第1  
5 操作量成分と、少なくとも前記許容範囲に基づき決定される第2操作量成分とを含み、

前記床反力操作量を決定する手段は、前記第1操作量成分のみを前記分配手段に入力したと仮定した場合に前記第2動力学モデルが出力するモデル床反力瞬時値に対応する前記制限対象量の推定値を求める手段と、

- 10 その求めた制限対象量の推定値を前記許容範囲と比較し、その比較に基づき該許容範囲内に制限してなる制限済制限対象量を決定する手段と、

少なくとも該制限済制御対象量に基づき前記第2操作量成分を決定する手段とを備えることを特徴とする請求の範囲第28項に記載の脚式移動ロボットの歩容生成装置。

- 15 36. 前記床反力操作量は、少なくとも前記差に応じて決定される第1操作量成分と、少なくとも前記要求値及び許容範囲に基づき決定される第2操作量成分とを含み、

前記床反力操作量を決定する手段は、前記第2操作量成分を前記要求値に一致させて前記第1操作量成分と共に前記分配手段に入力したと仮  
20 定した場合に前記第2動力学モデルが出力するモデル床反力瞬時値に対応する前記制限対象量の推定値を求める手段と、

その求めた制限対象量の推定値を前記許容範囲と比較し、その比較に基づき該許容範囲内に制限してなる制限済制限対象量を決定する手段と、

- 25 少なくとも該制限済制御対象量に基づき前記第2操作量成分を決定する手段とを備えることを特徴とする請求の範囲第29項に記載の脚式移動ロボットの歩容生成装置。

37. 前記第2操作量成分は前記床反力モーメント又はZMPを含むと共に、前記差は少なくとも該床反力モーメント又はZMPに係わる差を含み、

5 前記摂動モデル操作量を決定する手段は、前記差のうちの床反力モーメント又はZMPと、前記第2操作量成分の床反力モーメント又はZMPとが略等しくなるように前記第1操作量成分を決定する手段を備えることを特徴とする請求の範囲第35項又は第36項に記載の脚式移動ロボットの歩容生成装置。

38. 前記制限対象量は、前記並進床反力水平成分又は並進床反力の床面平行成分又は該ロボットの全体重心加速度水平成分又は全体重心加速度の床面平行成分を含んでおり、

15 前記床反力操作量を決定する手段は、前記制限対象量の推定値を求めるために、前記モデル床反力瞬時値として前記動力学モデルにより求められる並進床反力水平成分の瞬時値又は並進床反力の床面平行成分の瞬時値を用いることを特徴とする請求の範囲第35項又は第36項に記載の脚式移動ロボットの歩容生成装置。

39. 前記摂動モデルは、前記ロボットの上体の並進運動と、該ロボットの上体の姿勢変化運動とを含むモデルであると共に、前記制限対象量は、前記ロボットに作用する並進床反力水平成分又は並進床反力の床面平行成分又は該ロボットの全体重心加速度水平成分又は全体重心加速度の床面平行成分と、床反力モーメント又はZMPとからなり、

25 前記制限済制限対象量を決定する手段は、前記第2操作量成分のうち、前記上体の姿勢変化運動に対応する操作量成分の前記要求値からの変化が最小になり、且つ、各制限済制限対象量の前記推定値からの変化が最小になるように各制限済制限対象量を決定することを特徴とする請求の範囲第36項に記載の脚式移動ロボットの歩容生成装置。

40. 上体から延設された複数の脚体を運動させて移動する脚式移動ロボットの目標歩容を生成する歩容生成装置において、

前記ロボットに作用する並進床反力水平成分又は並進床反力の床面平行成分又は該ロボットの全体重心加速度水平成分又は全体重心加速度の床面平行成分と、床反力モーメント又はZMPとのうちの少なくともいずれかを制限対象量とし、該制限対象量の許容範囲を設定する許容範囲設定手段と、

前記目標歩容を構成する目標運動及び目標床反力のうちの少なくとも目標床反力の仮瞬時値を逐次決定する目標床反力仮瞬時値決定手段と、

10 少なくとも該目標床反力の仮瞬時値を、前記ロボットの運動と床反力との関係を表す第1動力学モデルに入力し、該第1動力学モデルの出力としての目標運動の第1仮瞬時値を求める第1モデル演算手段と、

15 少なくとも前記目標床反力の仮瞬時値を、前記ロボットの運動と床反力との関係を表す第2動力学モデルに入力し、該第2動力学モデルの出力としての目標運動の第2仮瞬時値を、該目標運動の第2仮瞬時値によって発生するロボットの慣性力と重力との合力に前記第2動力学モデル上で略釣り合う床反力瞬時値に対応する前記制限対象量が前記許容範囲内に収まるように求める第2モデル演算手段と、

20 少なくとも前記目標運動の第1仮瞬時値と第2仮瞬時値との差に基づいて、該差が零に近づくように床反力操作量を求める操作量算出手段と、

該床反力操作量を前記第1動力学モデル及び第2動力学モデルのうちの少なくともいずれか一方に追加的に入力するモデル入力補正手段とを備え、

25 前記目標運動の第2仮瞬時値を該目標運動の目標瞬時値として決定することを特徴とする脚式移動ロボットの歩容生成装置。

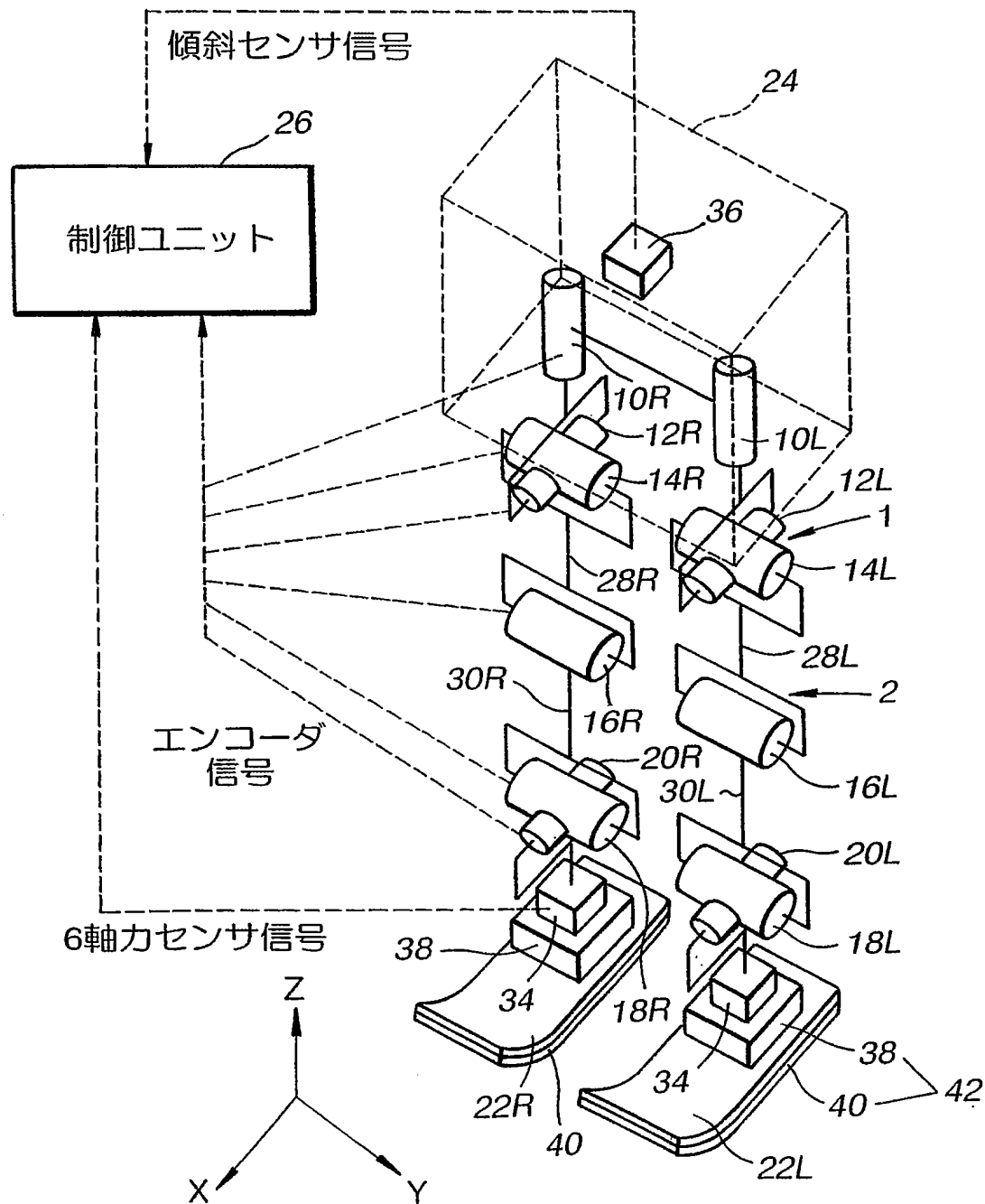
41. 前記目標運動の第1仮瞬時値と第2仮瞬時値との差は、前記ロボ

ットの所定の部位の位置の差を含み、又は、該ロボットの重心の位置の差と該ロボットの所定の部位の姿勢の差とを含むことを特徴とする請求の範囲第40項に記載の脚式移動ロボットの歩容生成装置。

42. 少なくとも前記目標床反力の仮瞬時値を、前記ロボットの運動と  
5 床反力との関係を表す第3動力学モデルに入力し、該第3動力学モデルの出力としての目標運動の第3仮瞬時値を求める第3モデル演算手段を備え、前記目標床反力の補正量の要求値を決定する手段は、前記決定した前記目標運動の目標瞬時値と前記目標運動の第3仮瞬時値との差に基づいて、該差が零に近づくように前記要求値を決定することを特徴とする請求の範囲第26項に記載の脚式移動ロボットの歩容生成装置。  
10

1/52

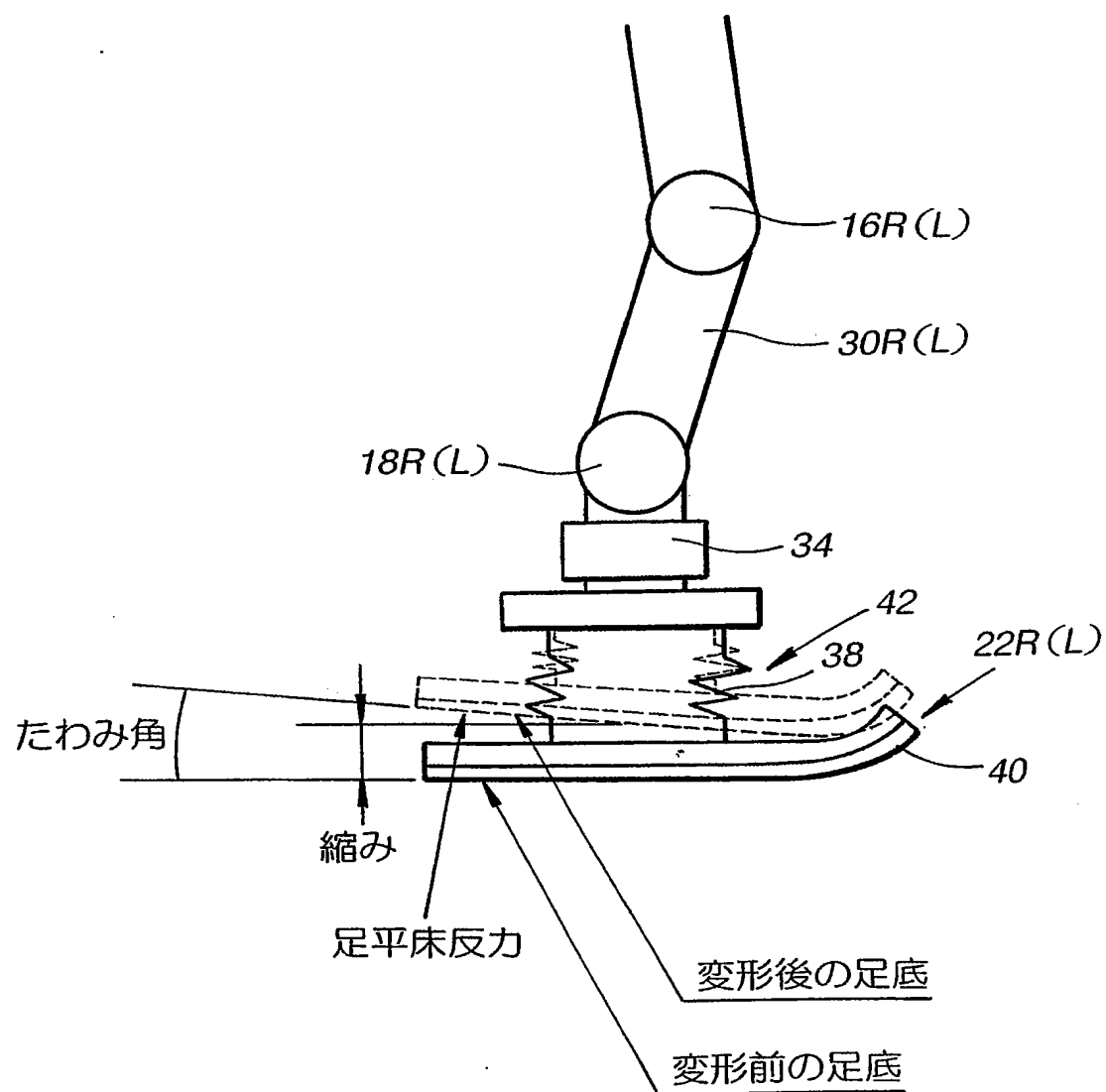
FIG. 1





2/52

FIG. 2



3/52

FIG. 3

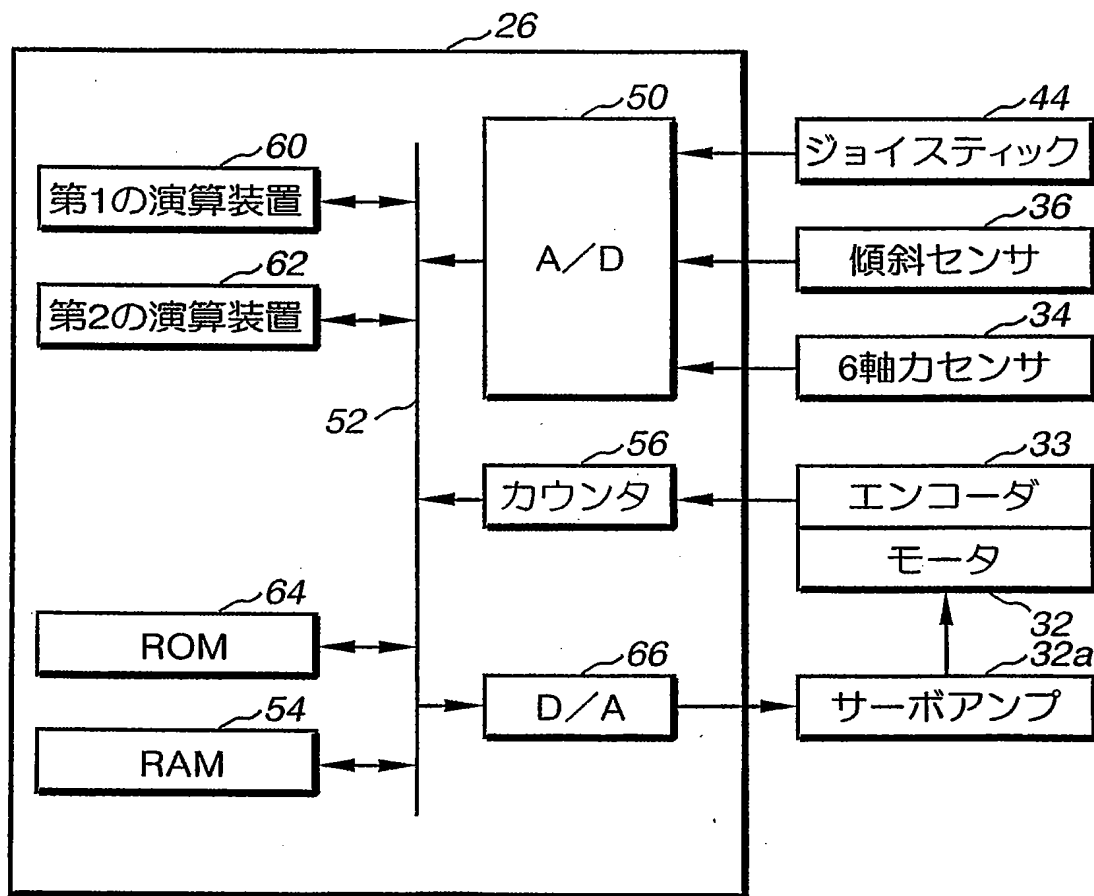


FIG. 4  
(制御ユニットの機能ブロック図)

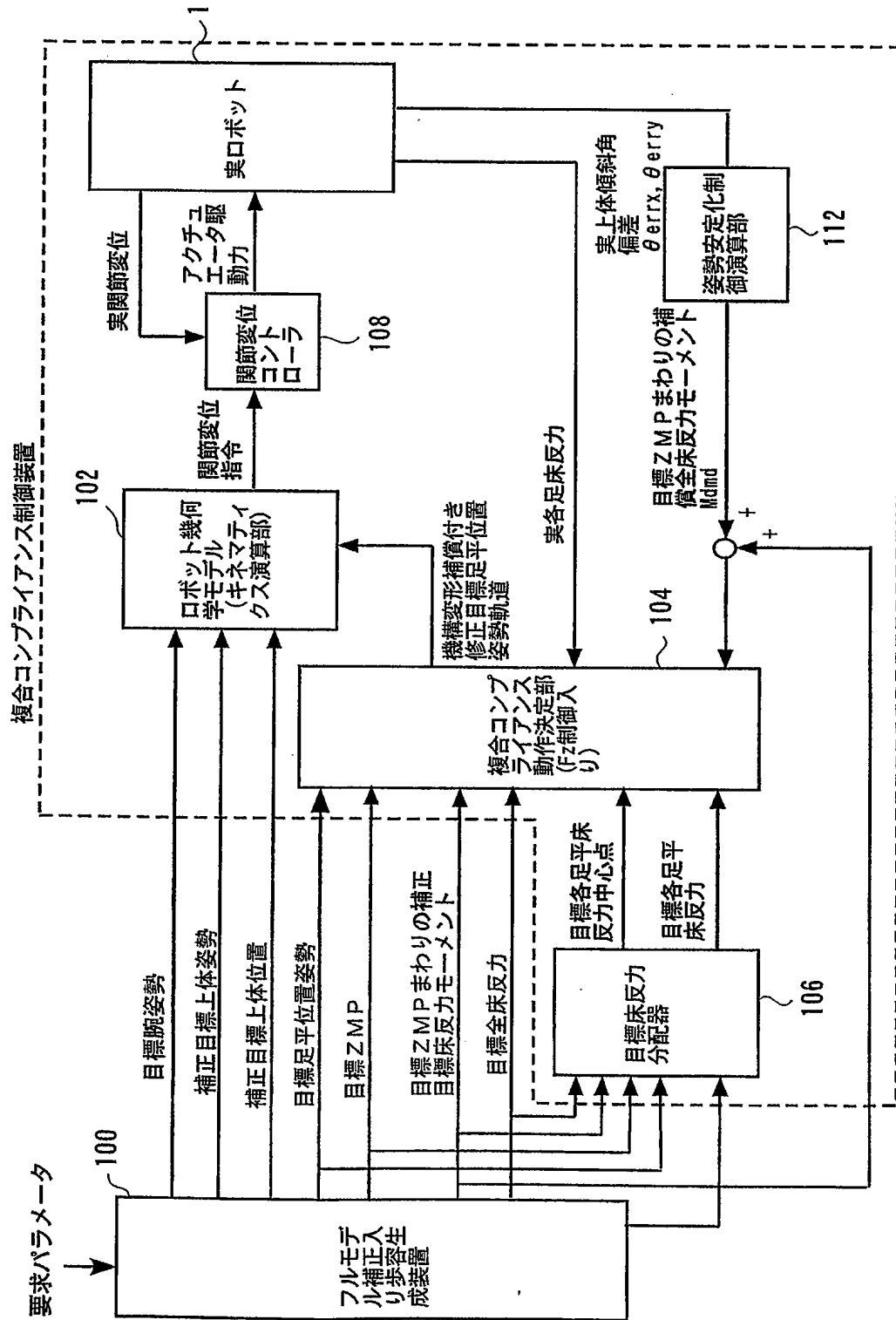
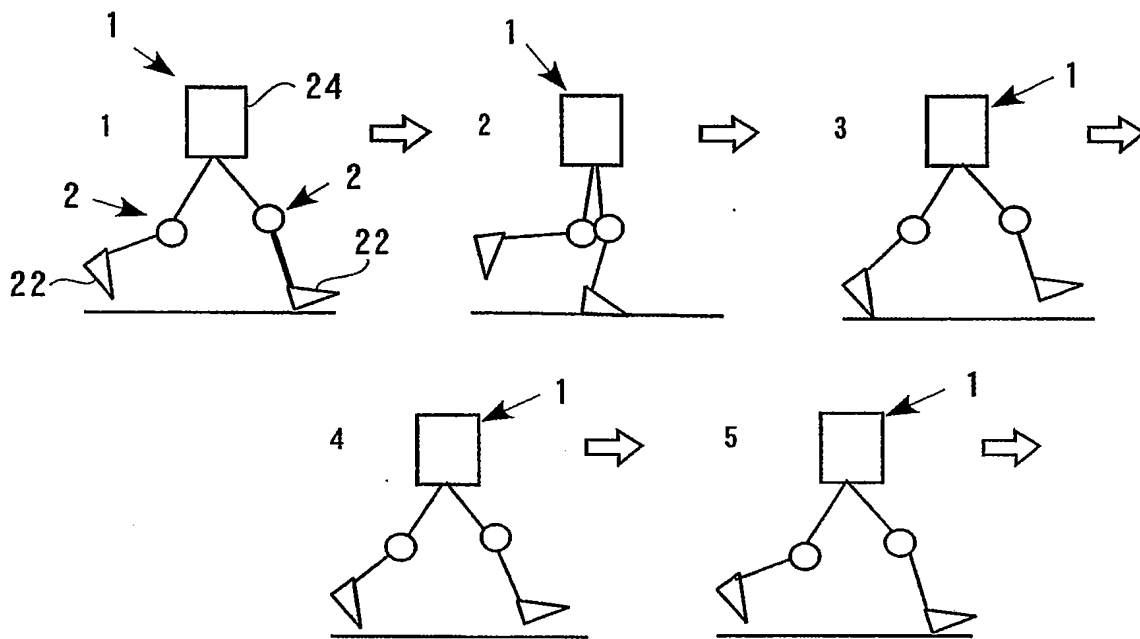


FIG. 5  
(走行歩容)



6/52

FIG. 6

(目標床反力鉛直成分)

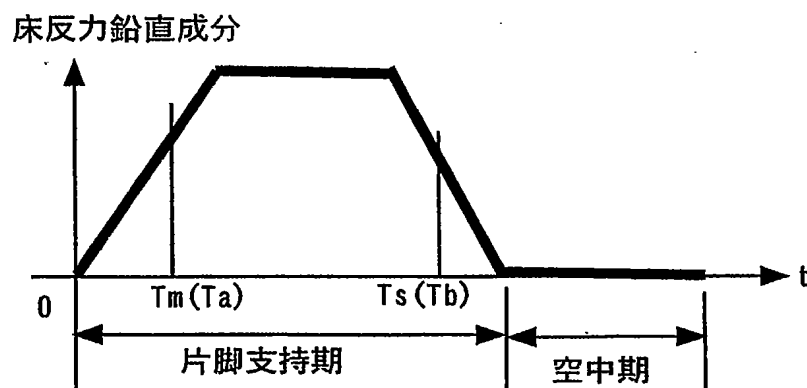
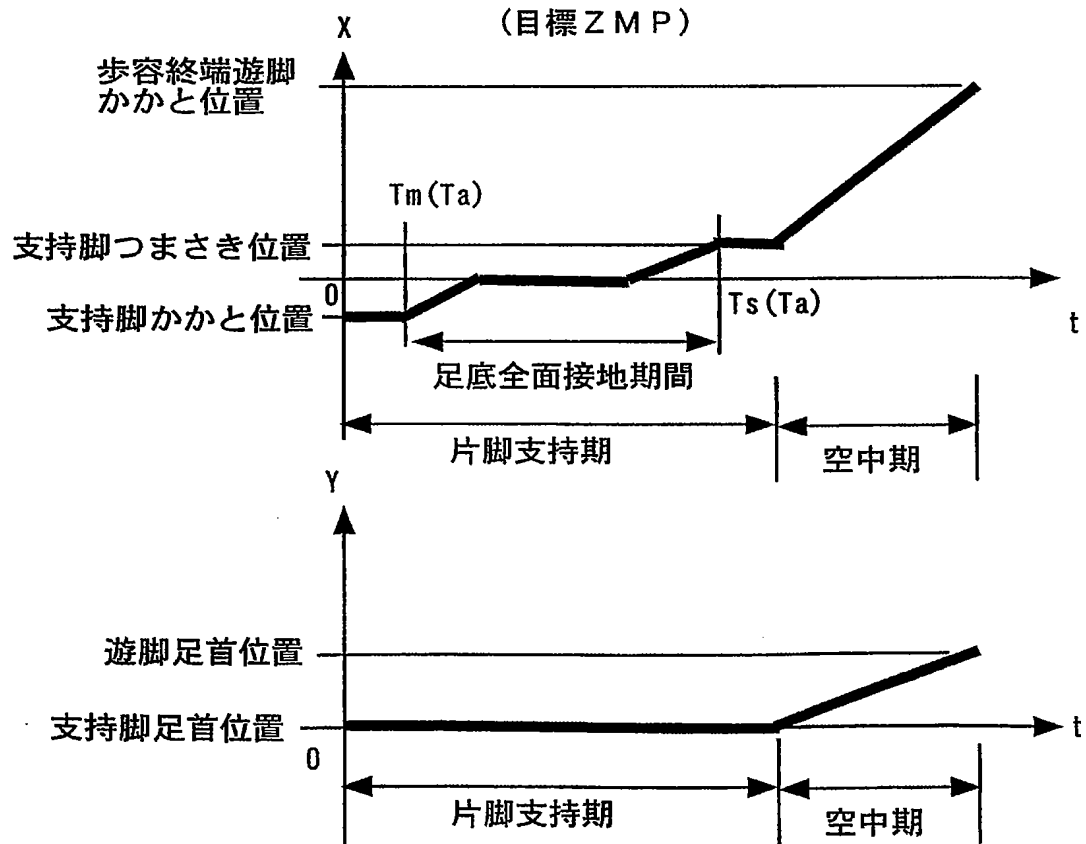


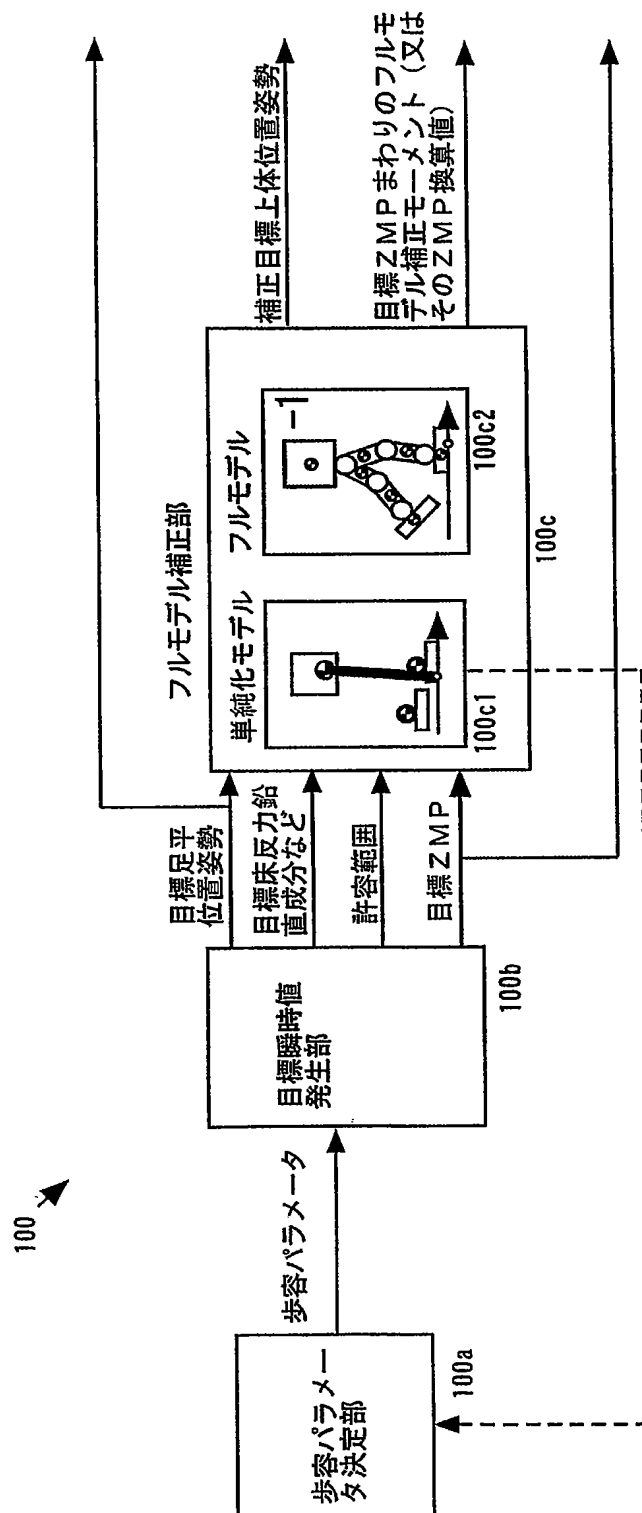
FIG. 7

(目標ZMP)



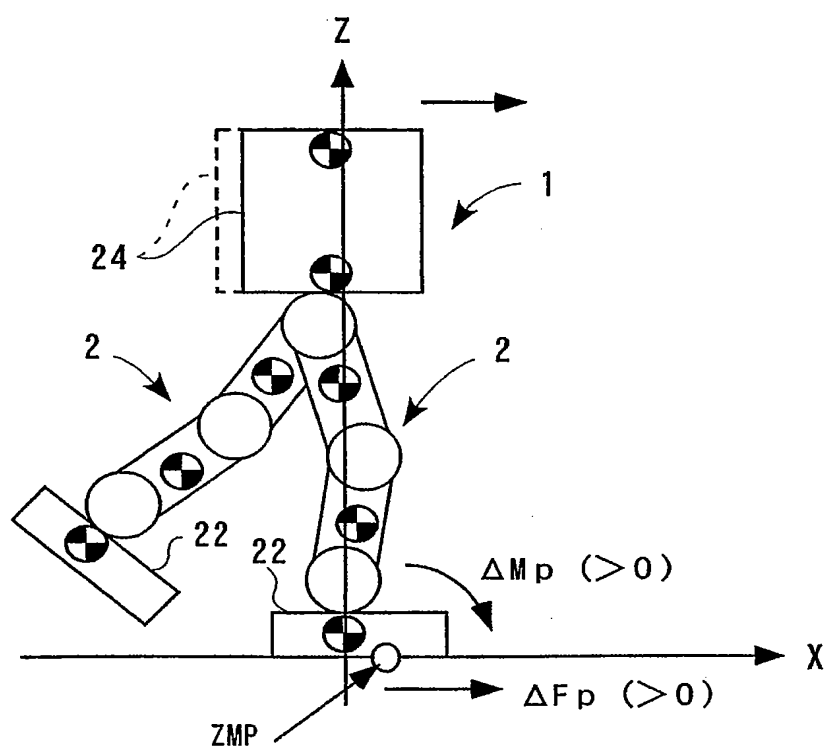
7/52

FIG. 8  
(フルモデル補正入り歩容生成装置の機能ブロック図)



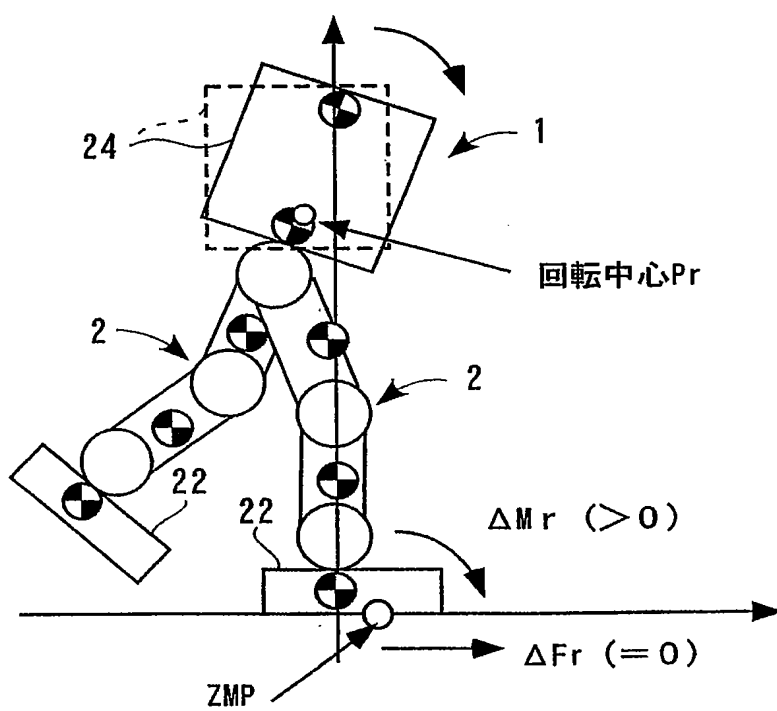
8/52

FIG. 9  
(上体並進モード)



9/52

FIG. 10  
(上体回転モード)





10/52

FIG. 11

(フライホイール付単純化モデル)

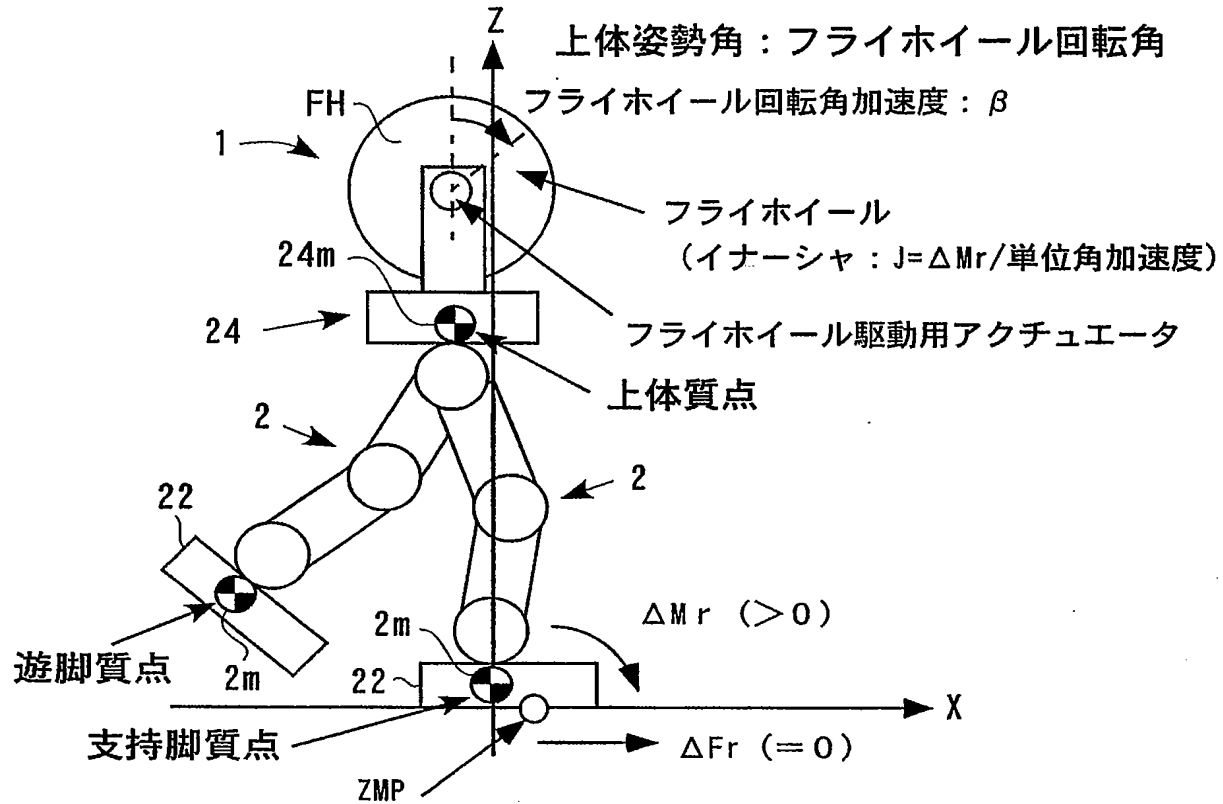
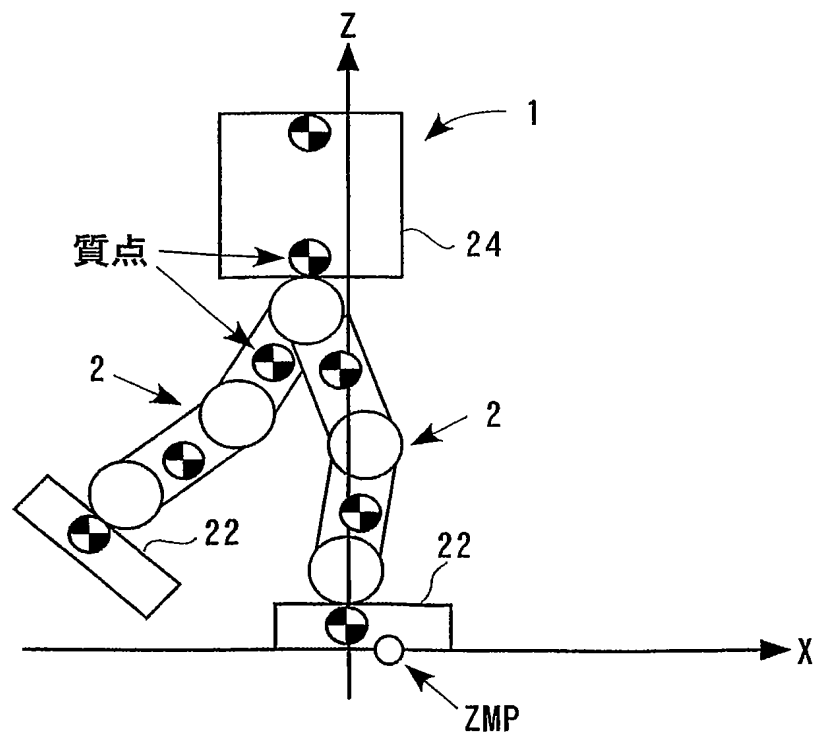


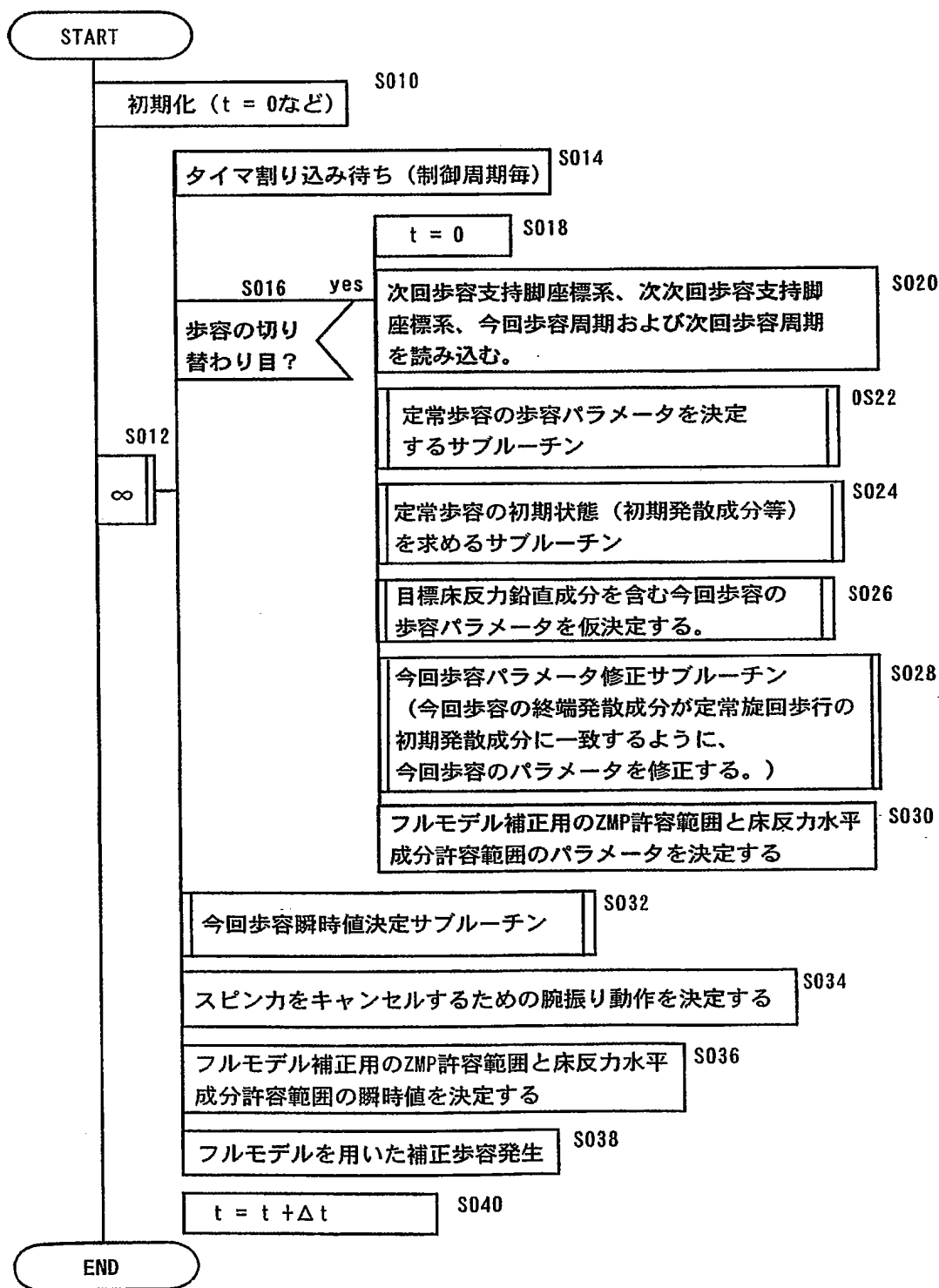
FIG. 12

(フルモデル)



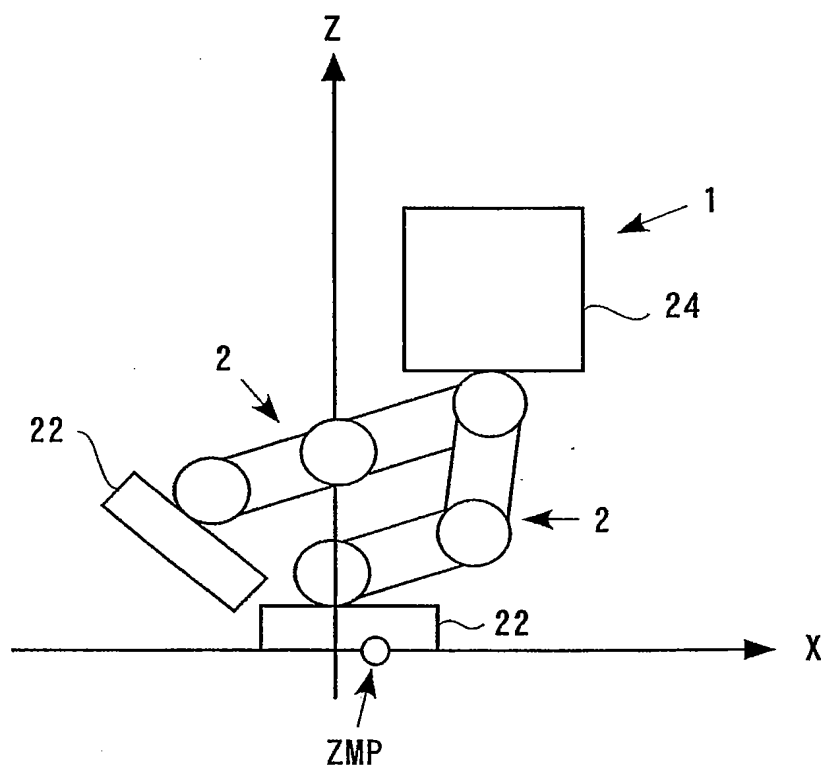
11/52

FIG. 13  
(歩容生成処理のフローチャート)



12/52

FIG. 14  
(上体位置発散状態)



13/52

FIG. 15

(定常歩容パラメータの決定処理)

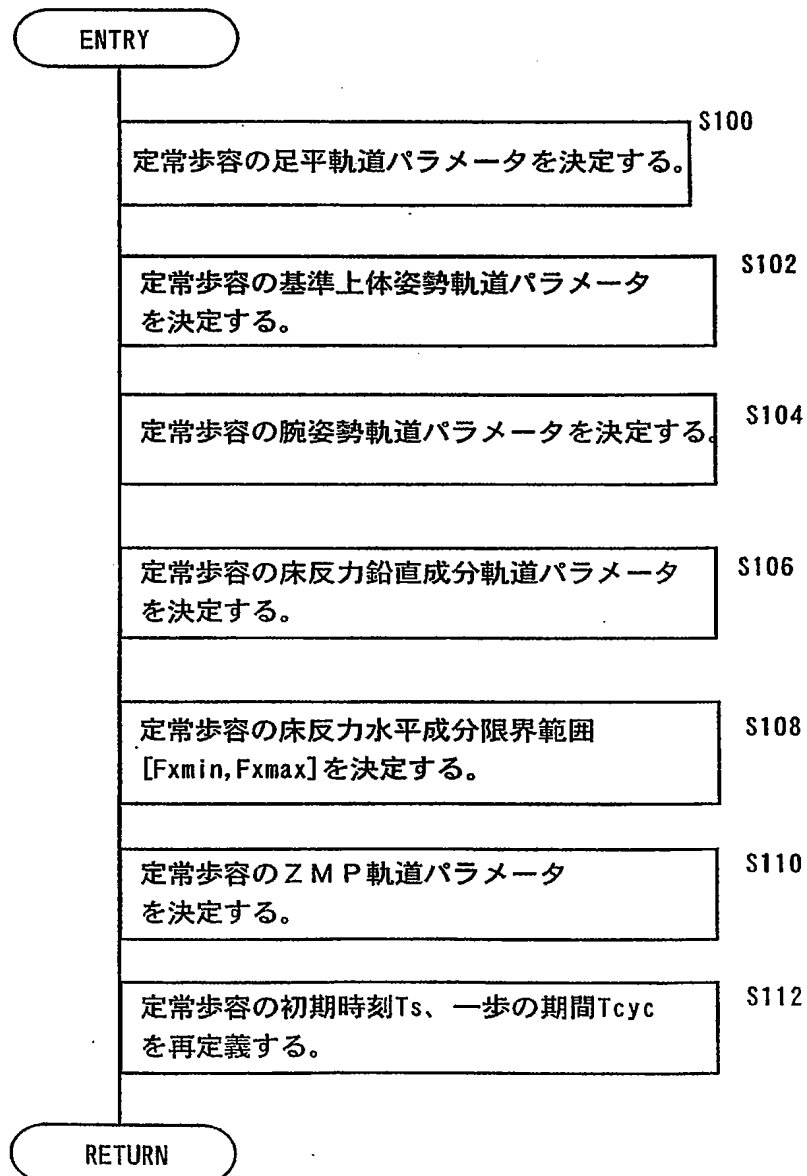
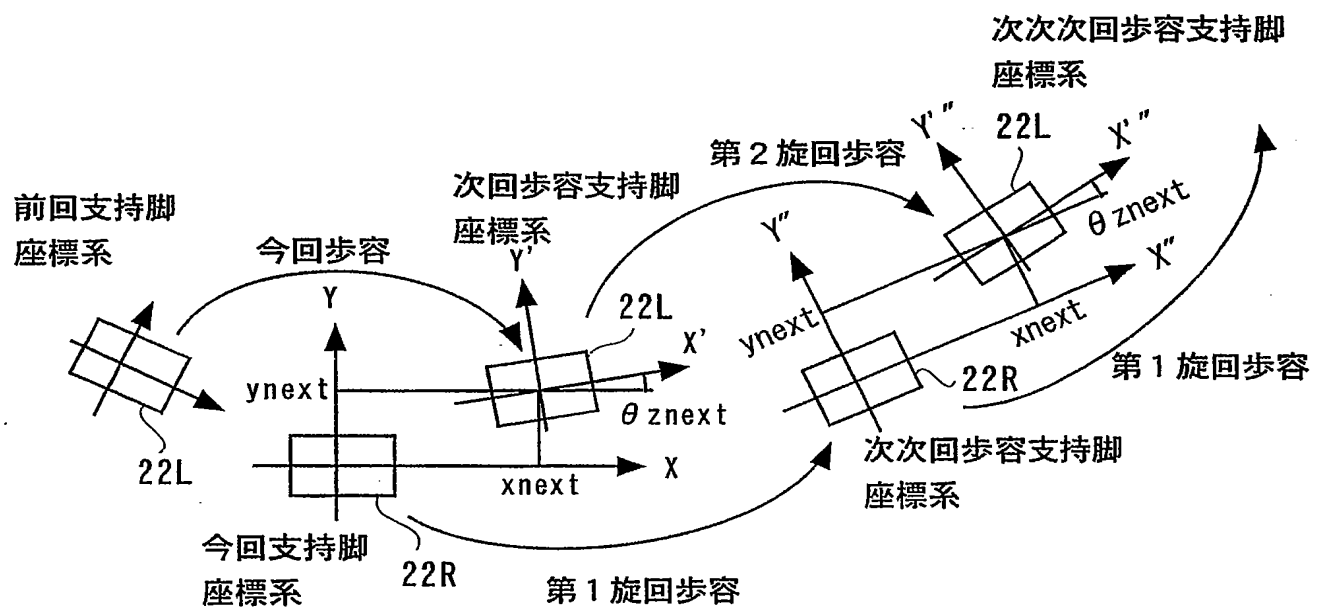


FIG. 16

(定常歩容の足平着地位置姿勢の関係)



15/52

FIG. 17

(目標床反力鉛直成分)

床反力鉛直成分

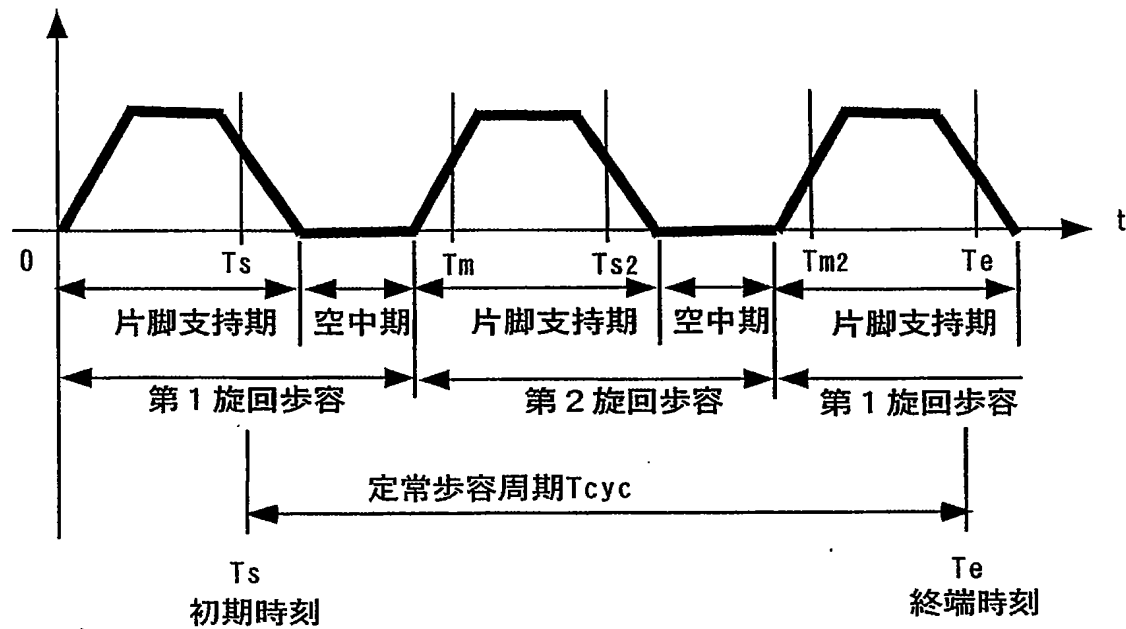
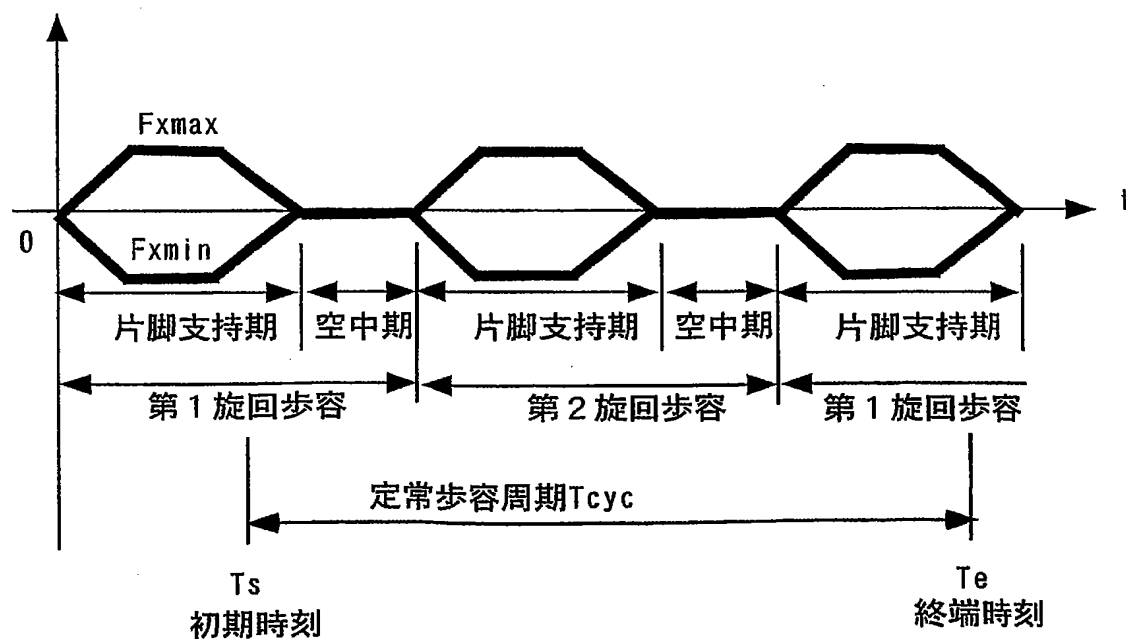


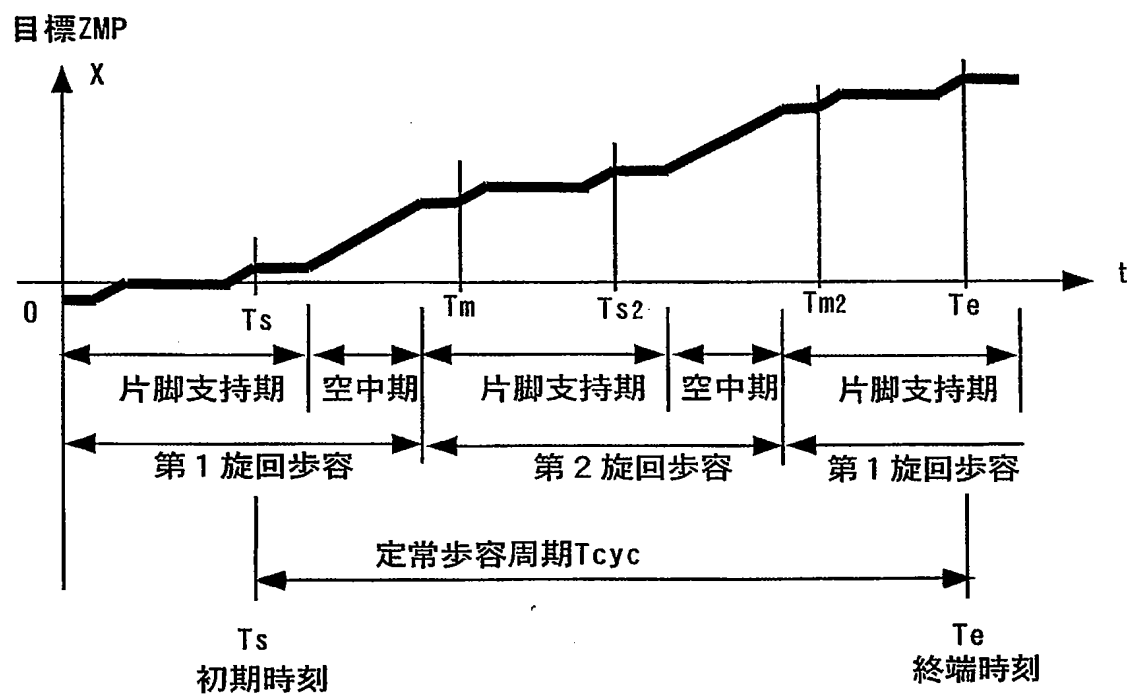
FIG. 18

(床反力水平成分許容範囲)

床反力水平成分許容下限値  $F_{xmin}$  と床反力水平成分許容上限値  $F_{xmax}$ 

16/52

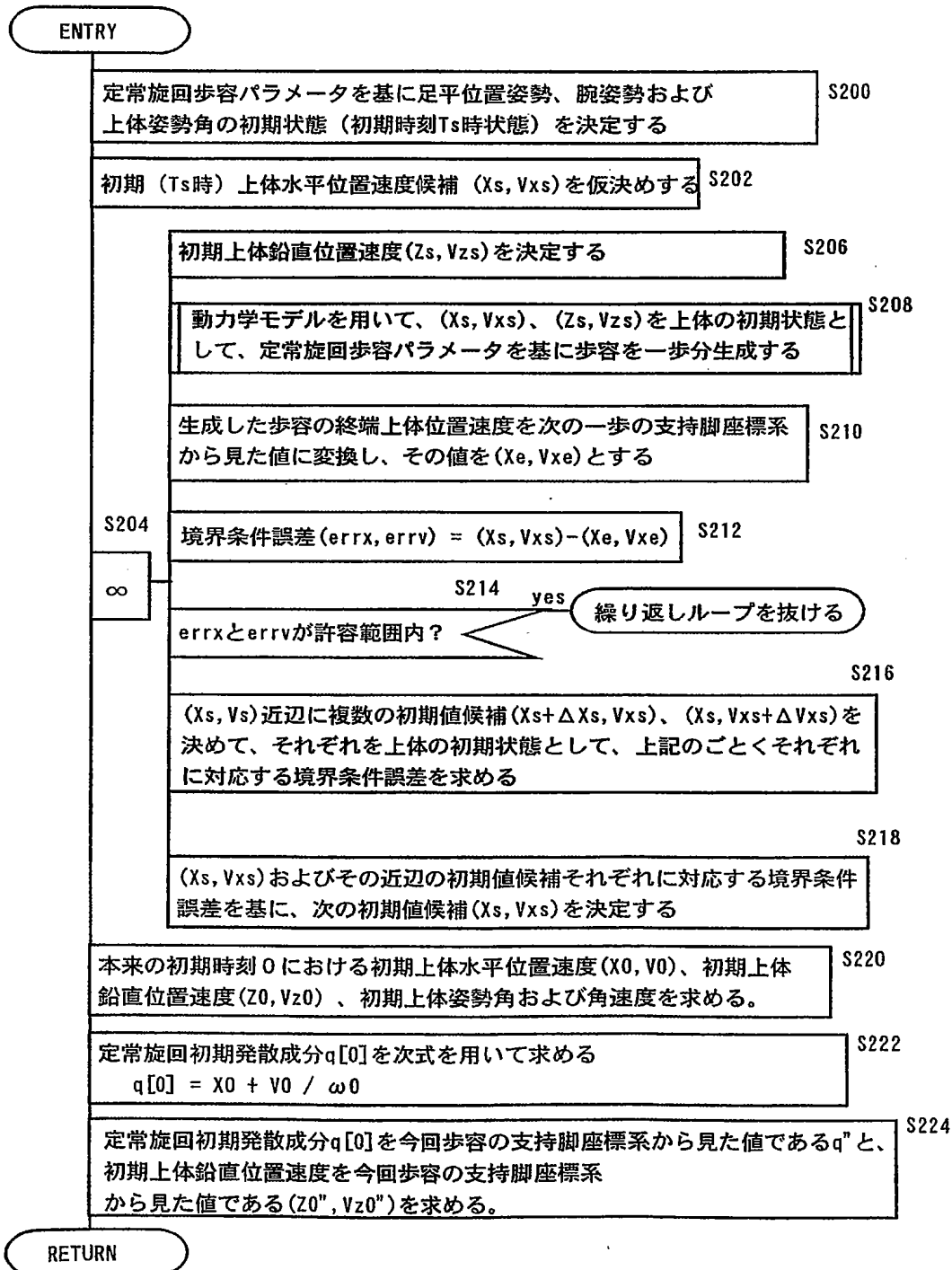
FIG. 19  
(目標ZMP)



17/52

FIG. 20

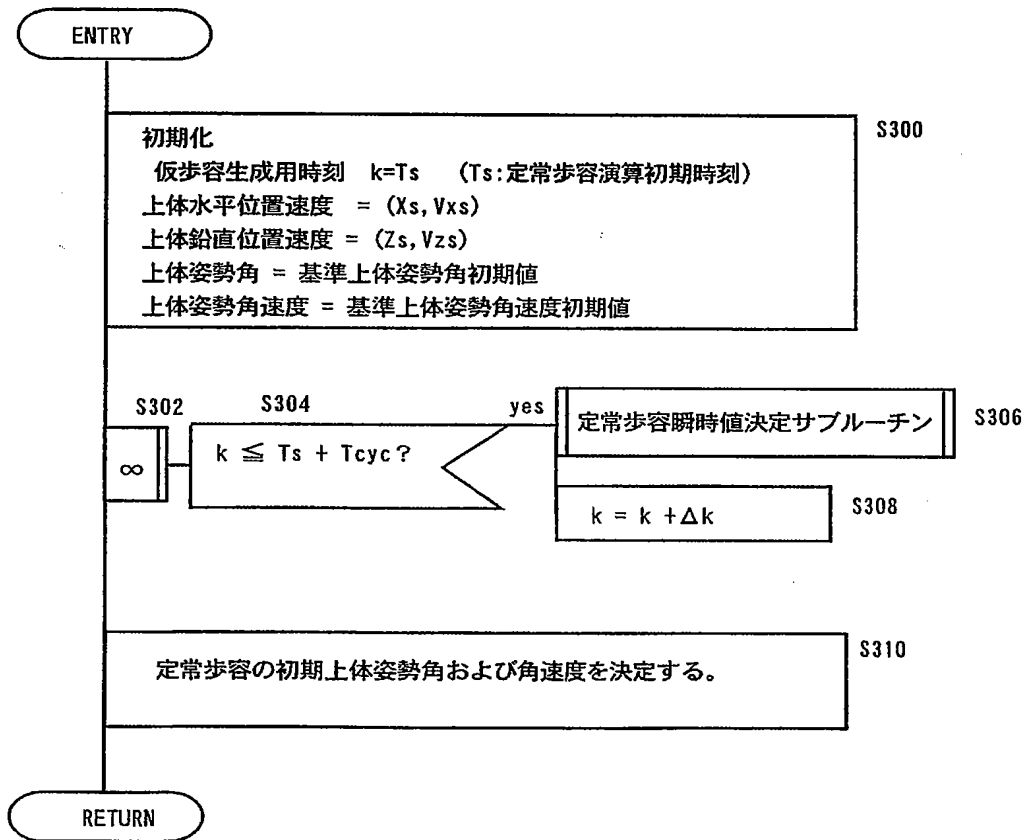
(定常歩容の初期発散成分の探索処理)





18/52

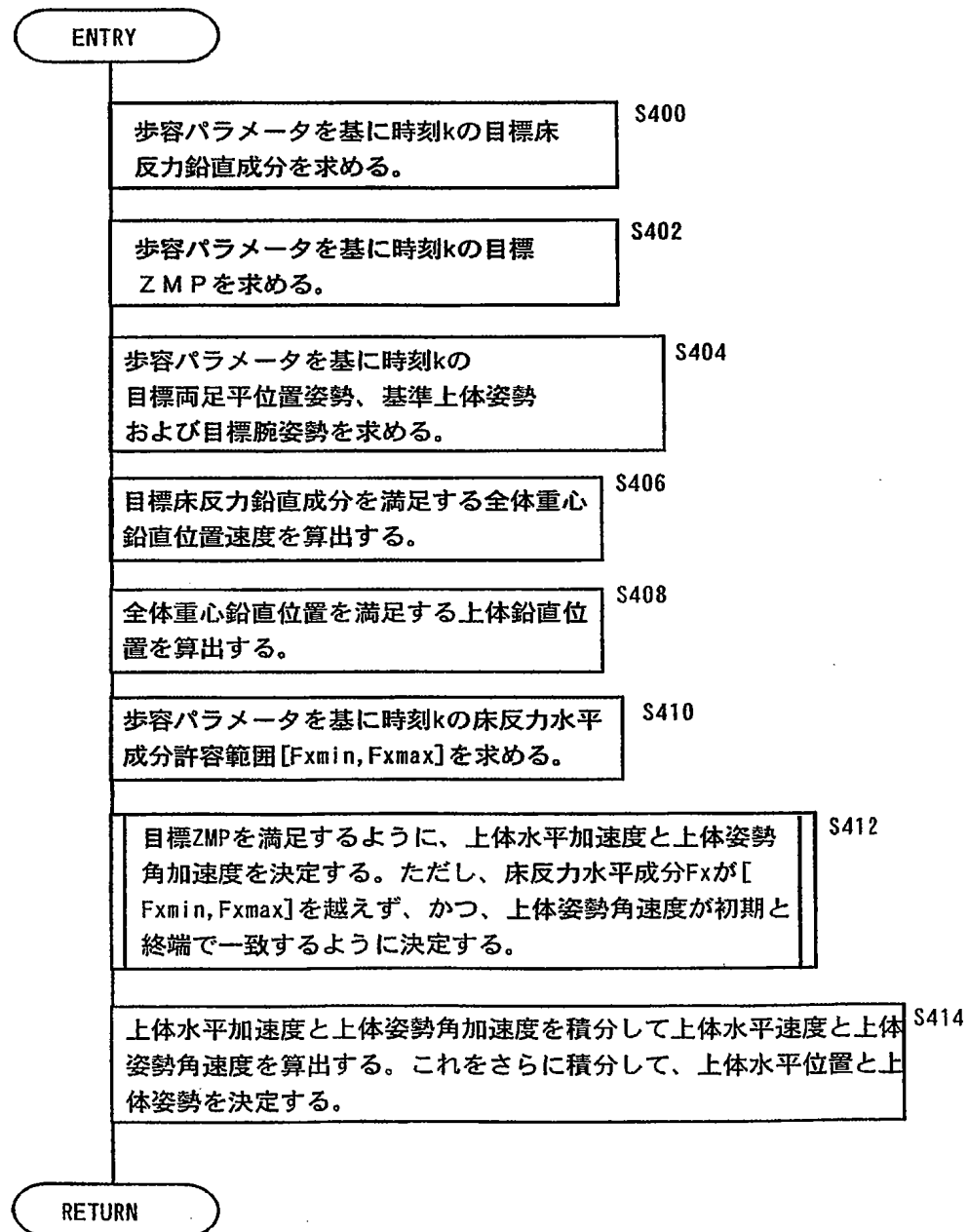
FIG. 21  
(定常歩容の仮歩容生成処理)



19/52

## FIG. 22

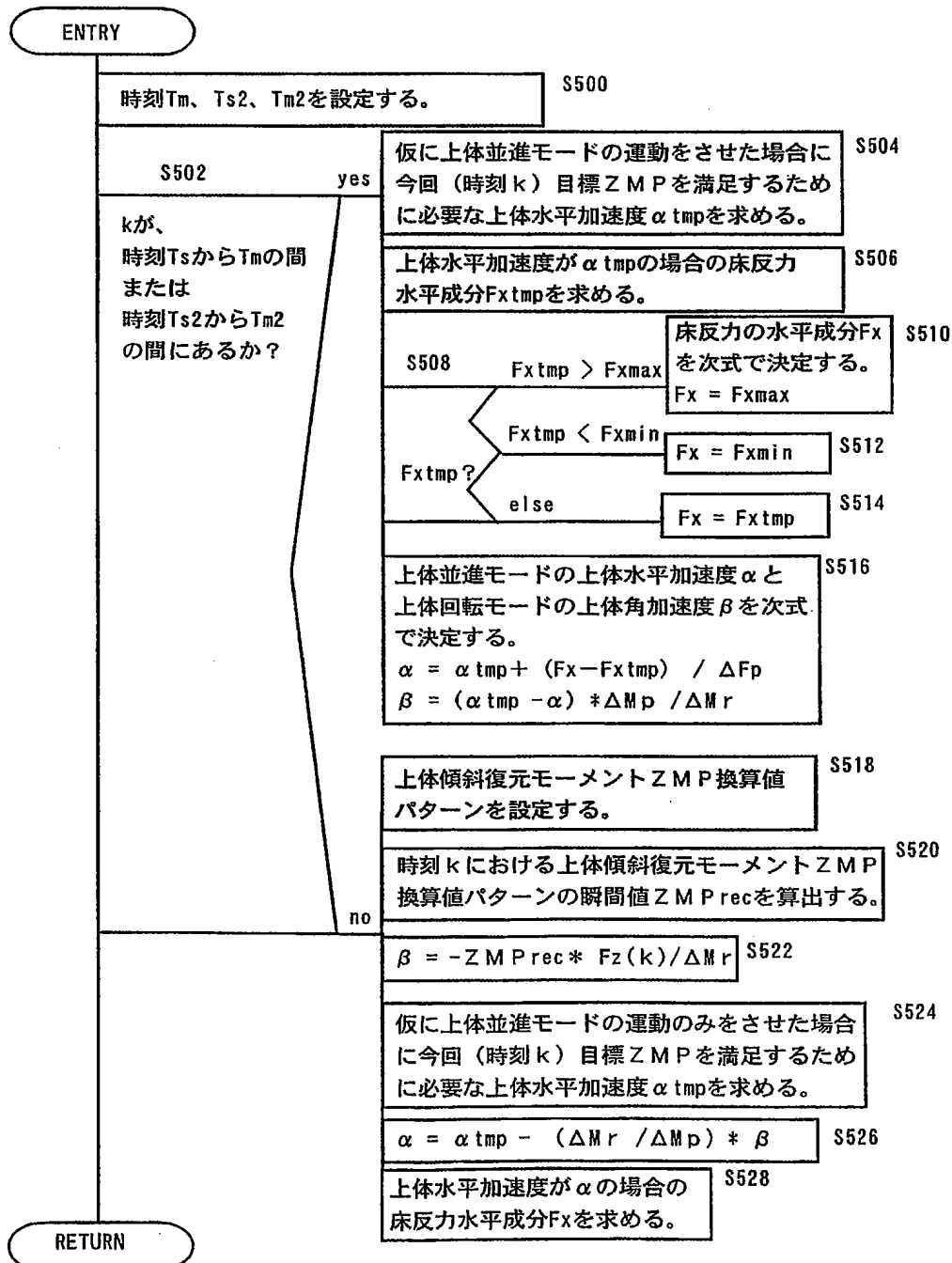
(定常歩容瞬時値決定処理)



20/52

FIG. 23

(定常歩容の上体水平加速度／上体姿勢角加速度決定処理)



21/52

FIG. 24

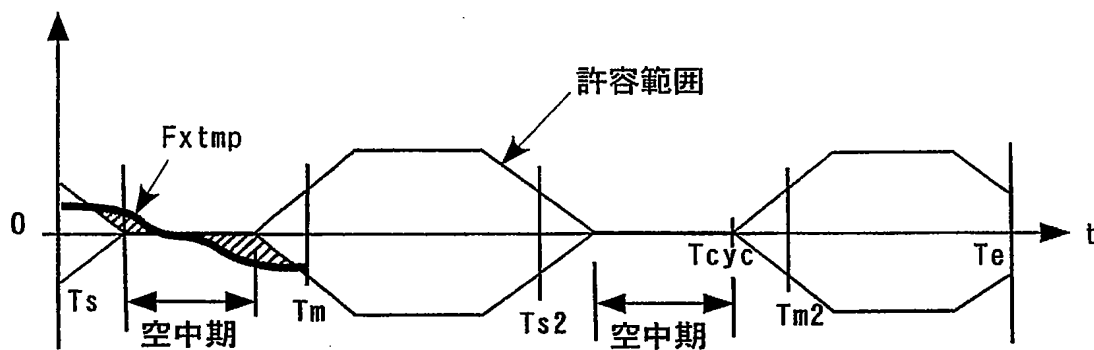
許容範囲を考慮せずに作成した床反力水平成分 $F_{xtmp}$ 

FIG. 25

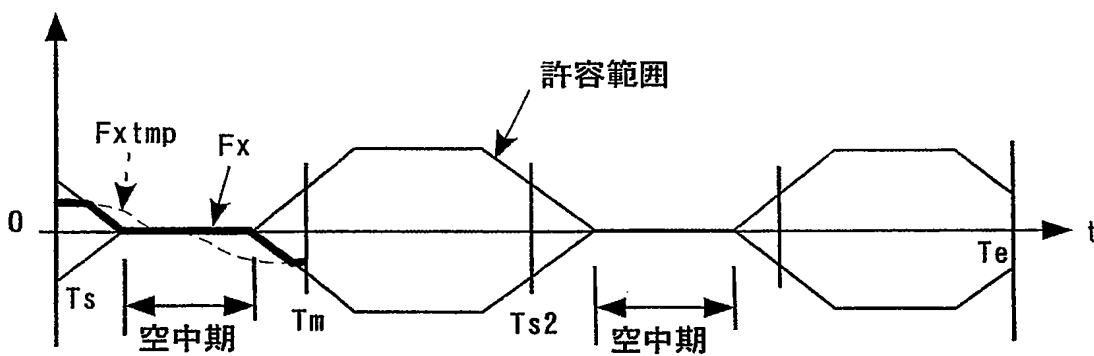
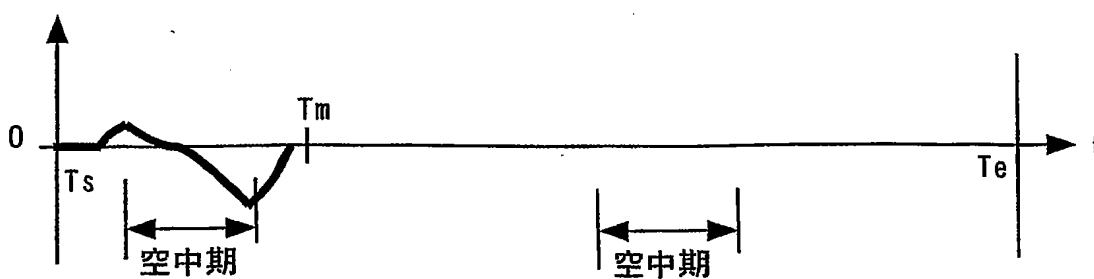
床反力水平成分許容範囲を考慮した床反力水平成分 $F_x$ 

FIG. 26

上体傾斜角加速度  $\beta$ 

22/52

FIG. 27

上体傾斜復元モーメントZMP換算値 (ZMPrec)

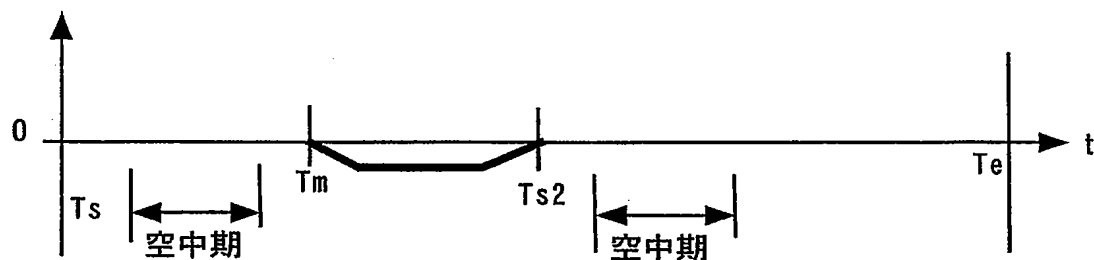


FIG. 28

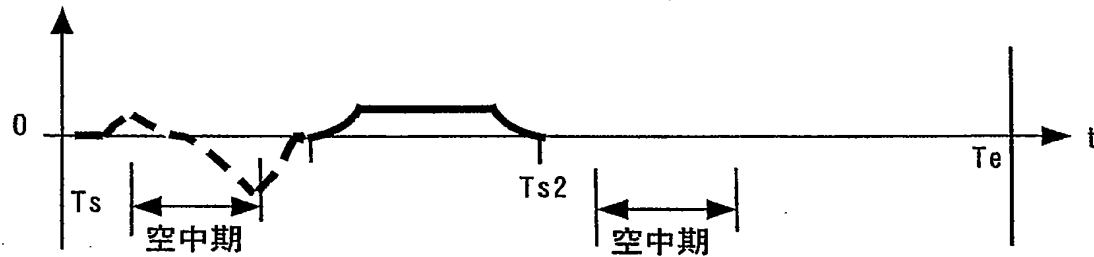
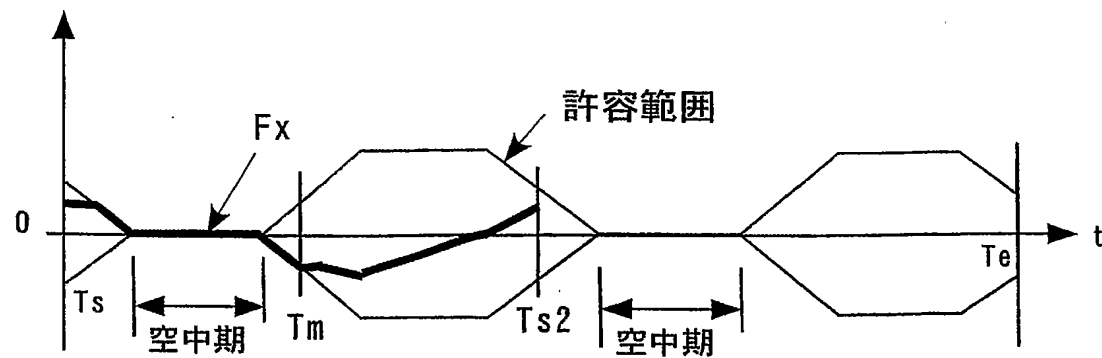
(上体傾斜速度を初期値に戻すための) 上体傾斜角加速度  $\beta$ 

FIG. 29

床反力水平成分許容範囲を考慮した床反力水平成分  $F_x$ 

23/52

FIG. 30

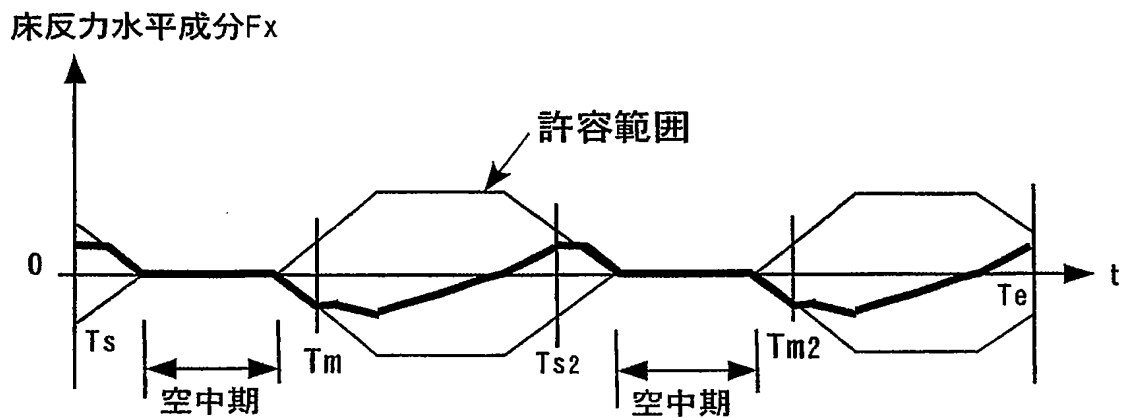
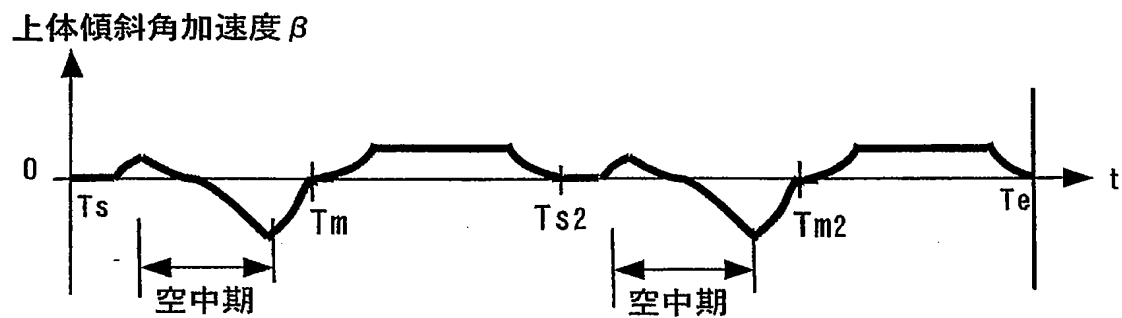


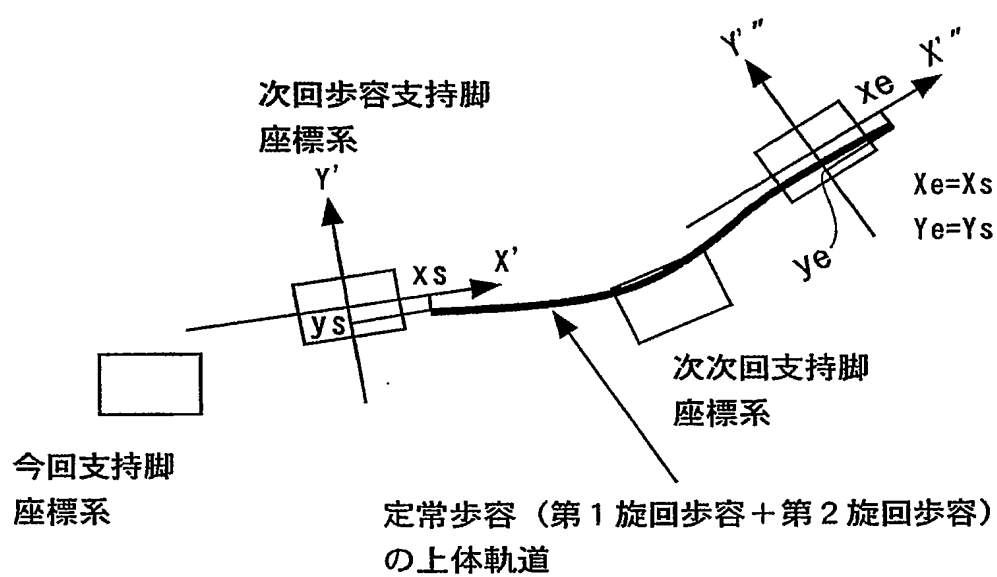
FIG. 31



24/52

FIG. 32

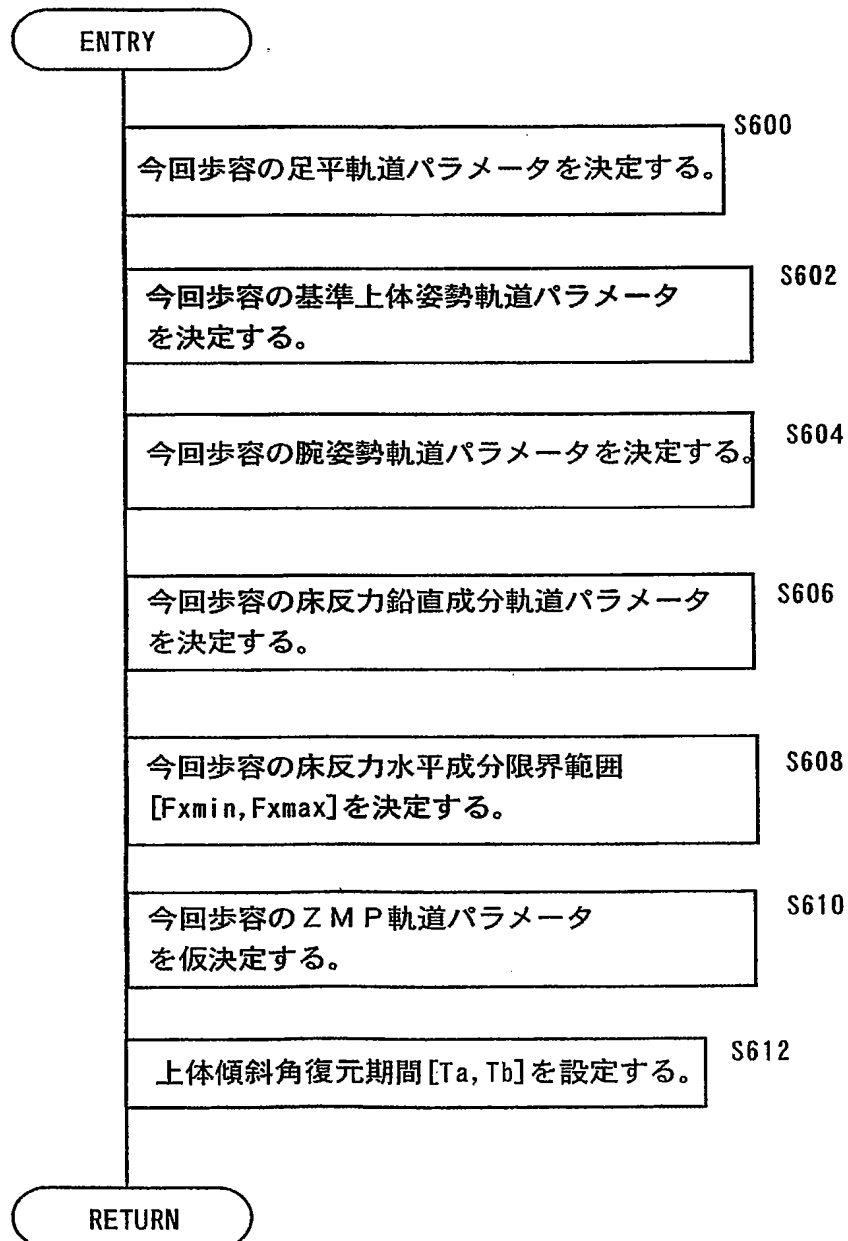
(定常歩容の着地時上体位置の関係)



25/52

FIG. 33

(今回歩容パラメータの仮決定処理)

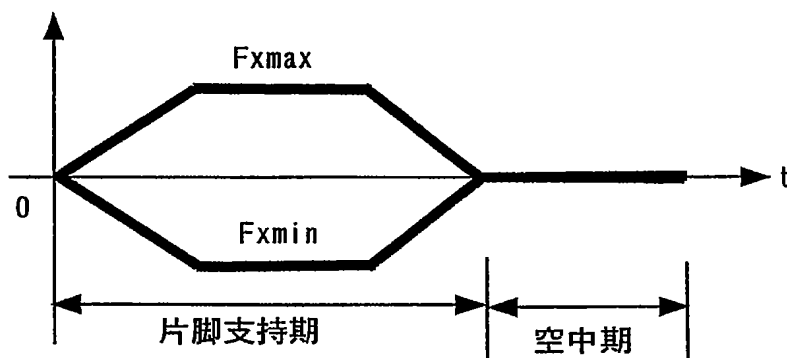




26/52

FIG. 34  
(床反力水平成分許容範囲)

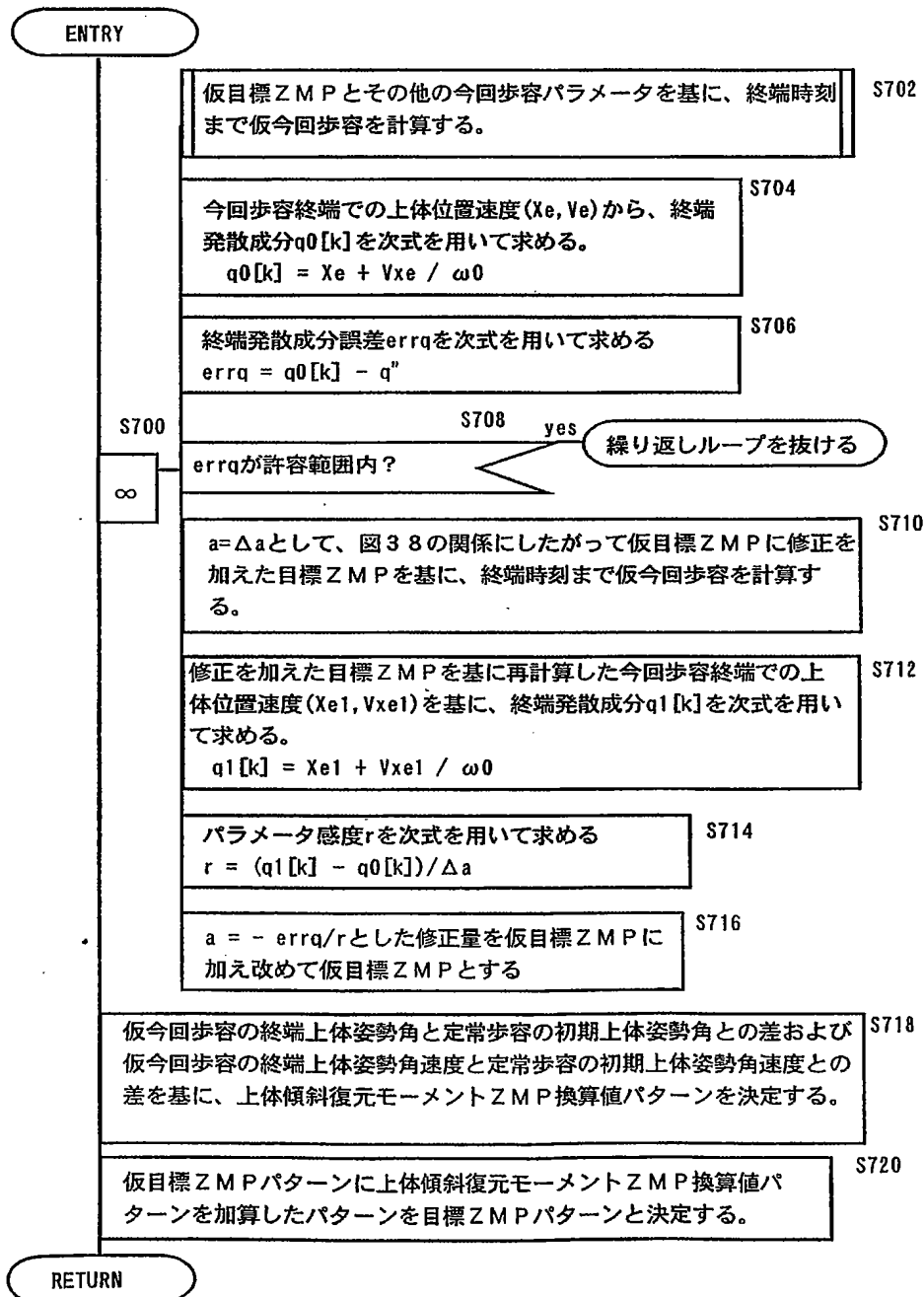
床反力水平成分許容下限値 $F_{xmin}$ と床反力水平成分許容上限値 $F_{xmax}$



27/52

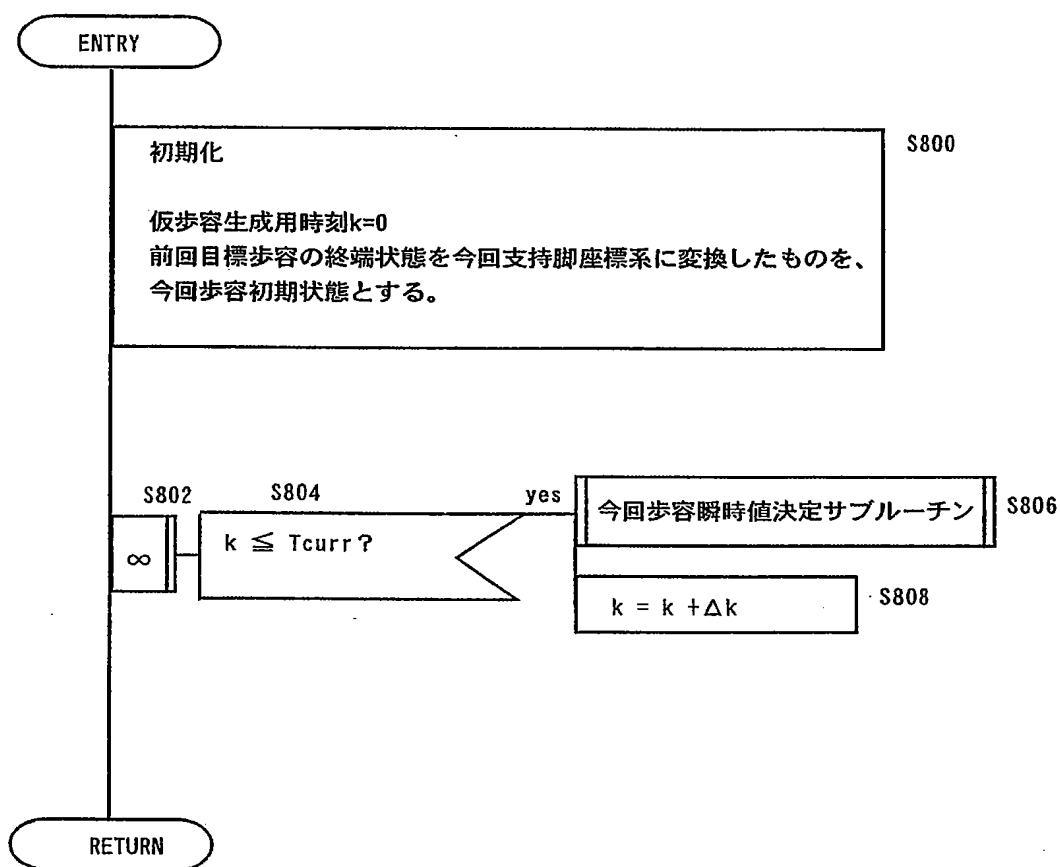
FIG. 35

(探索的な今回歩容パラメータの修正処理)



28/52

FIG. 36  
(仮今回歩容生成処理)



29/52

FIG. 37

(今回仮歩容瞬時値決定処理)

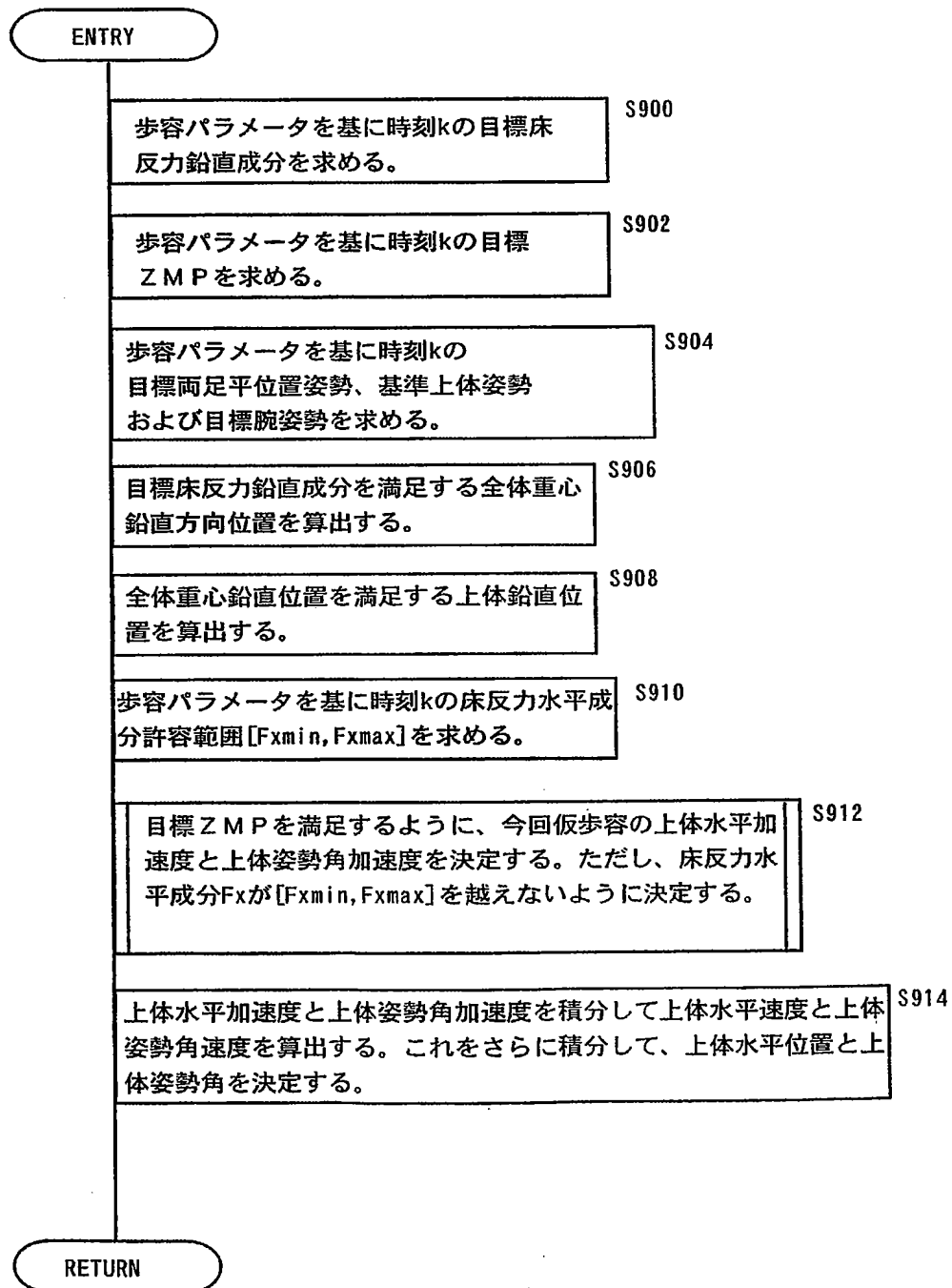
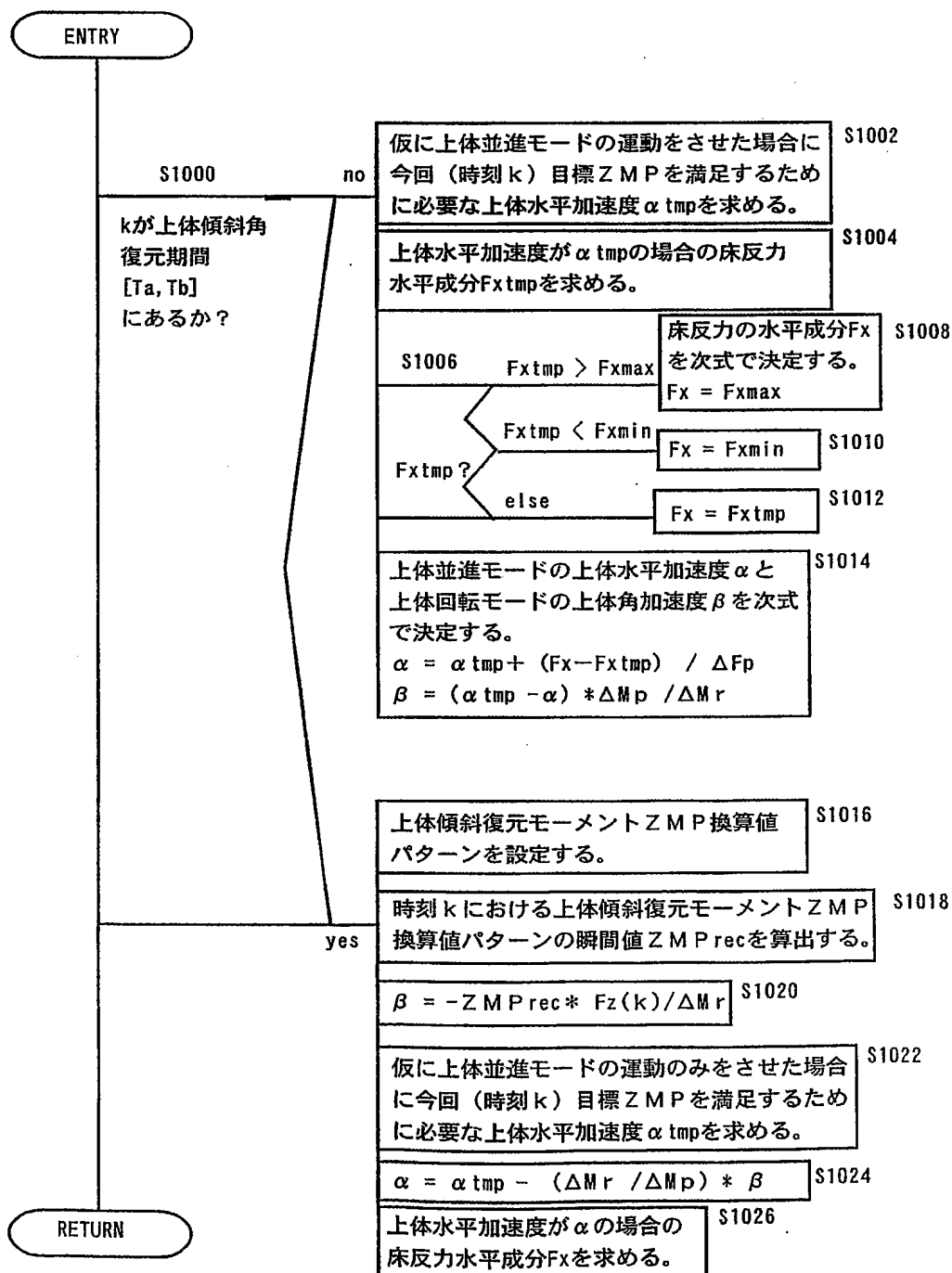


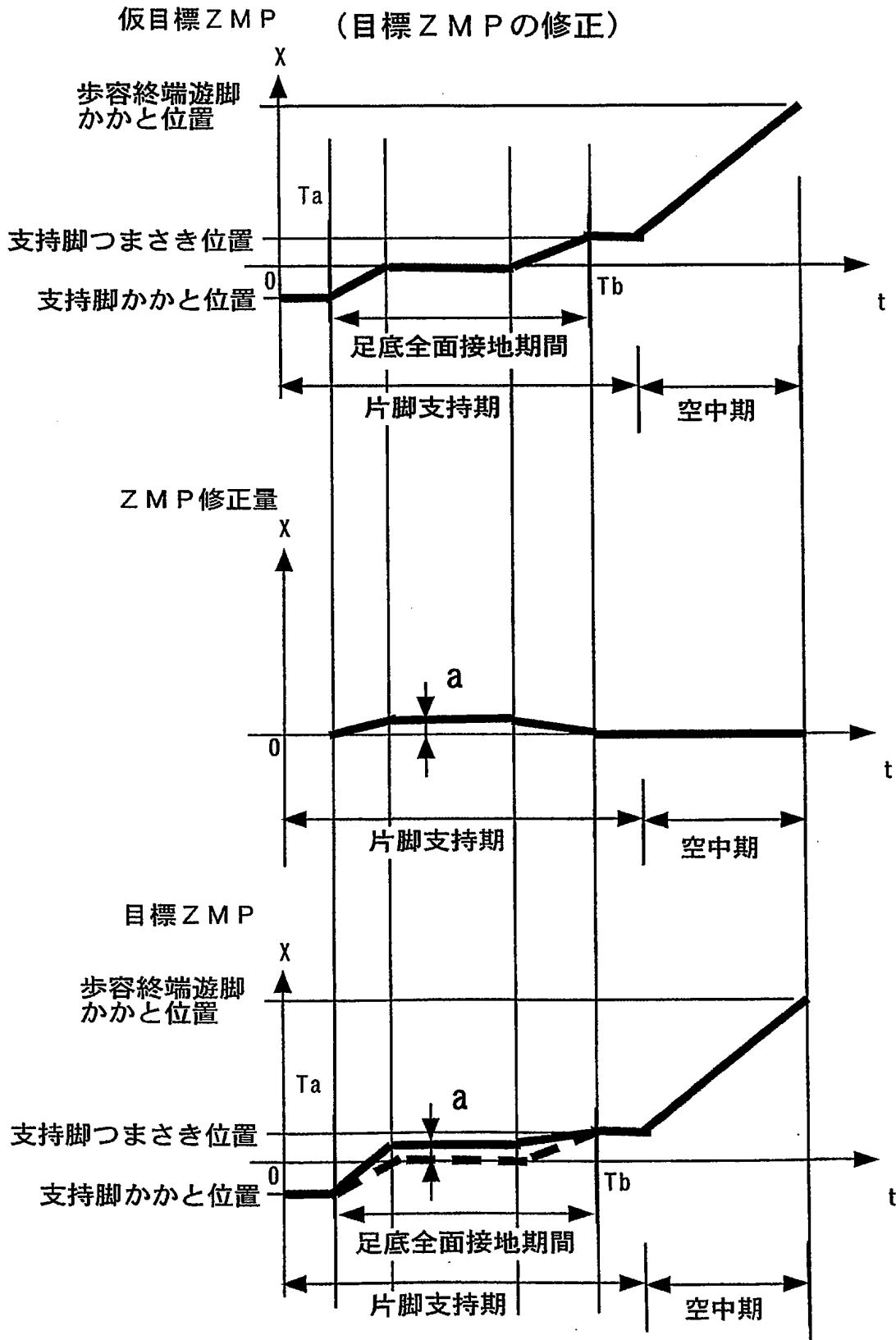
FIG. 38

(今回歩容の上体水平加速度／上体姿勢角加速度決定処理)



31/52

FIG. 39



32/52

FIG. 40  
(歩行時目標床反力鉛直成分)

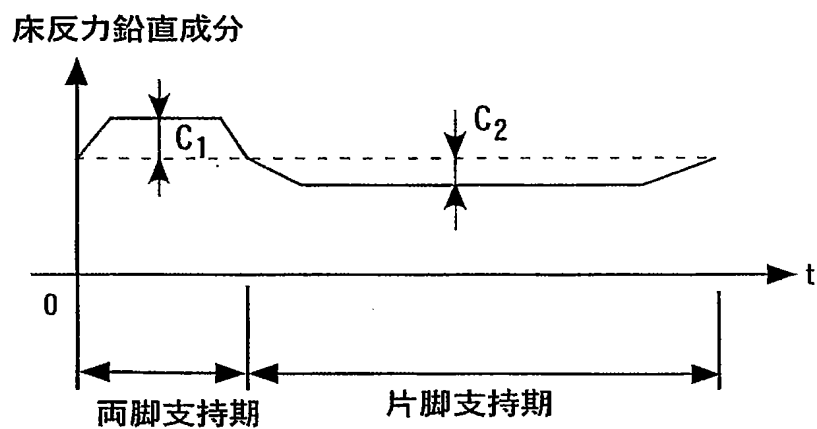


FIG. 41  
(フルモデル補正方式の分類表)

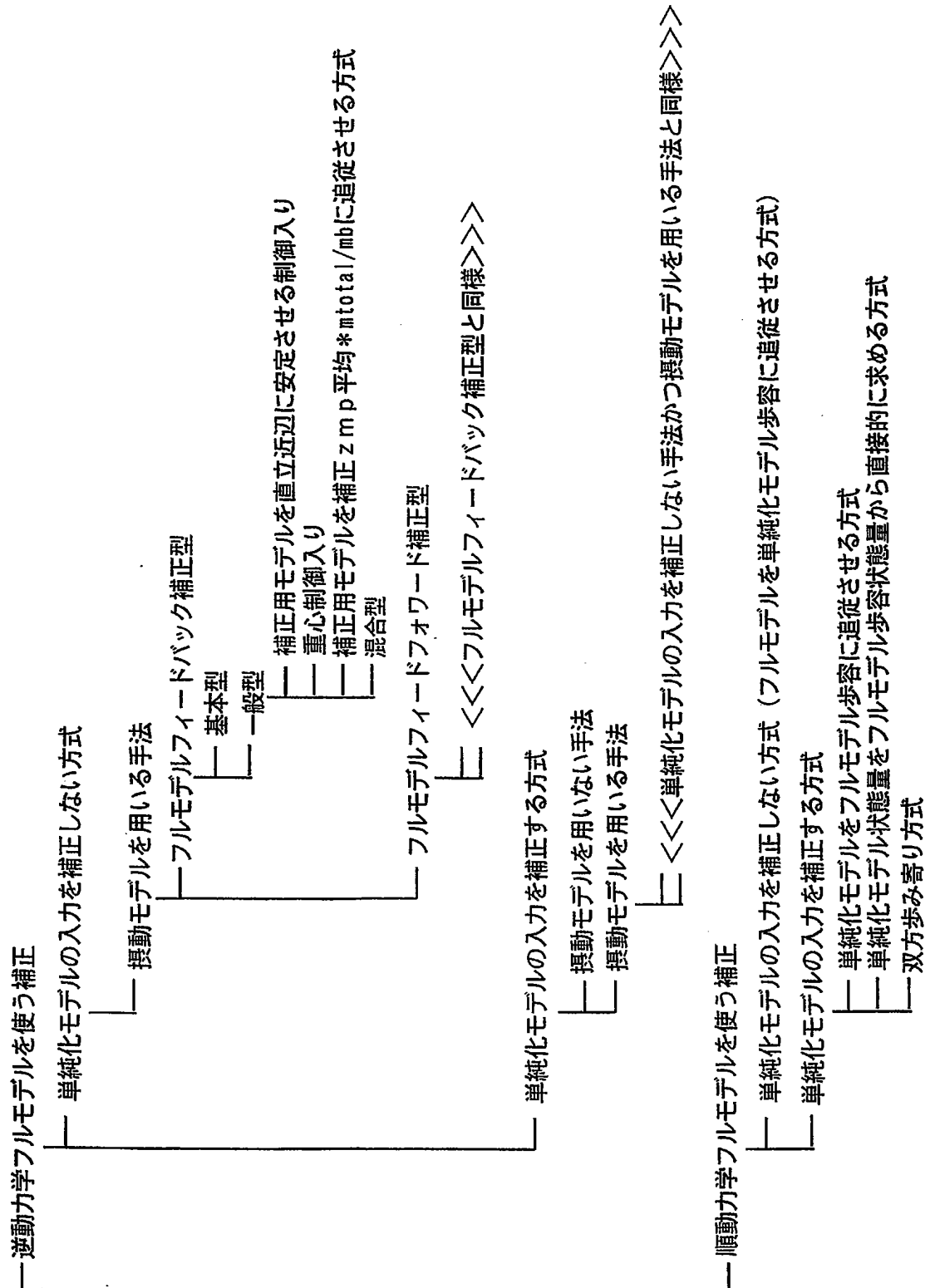
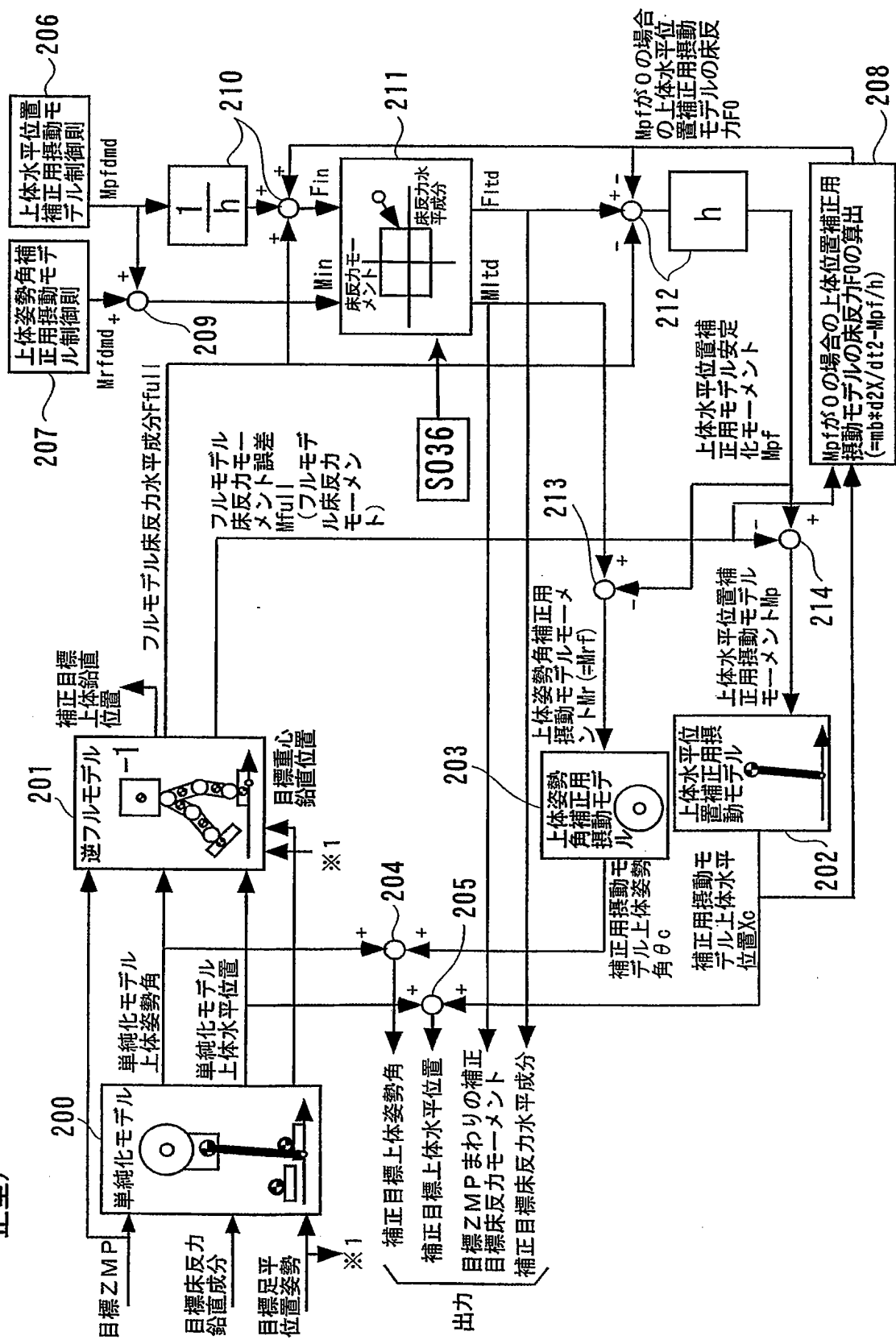




FIG. 42

(逆動力学フルモデルを使う補正、単純化モデル歩容の入力を補正しない方式、フルモデルFF補正型)



35/52

FIG. 43  
(上体水平位置補正用摂動モデル)

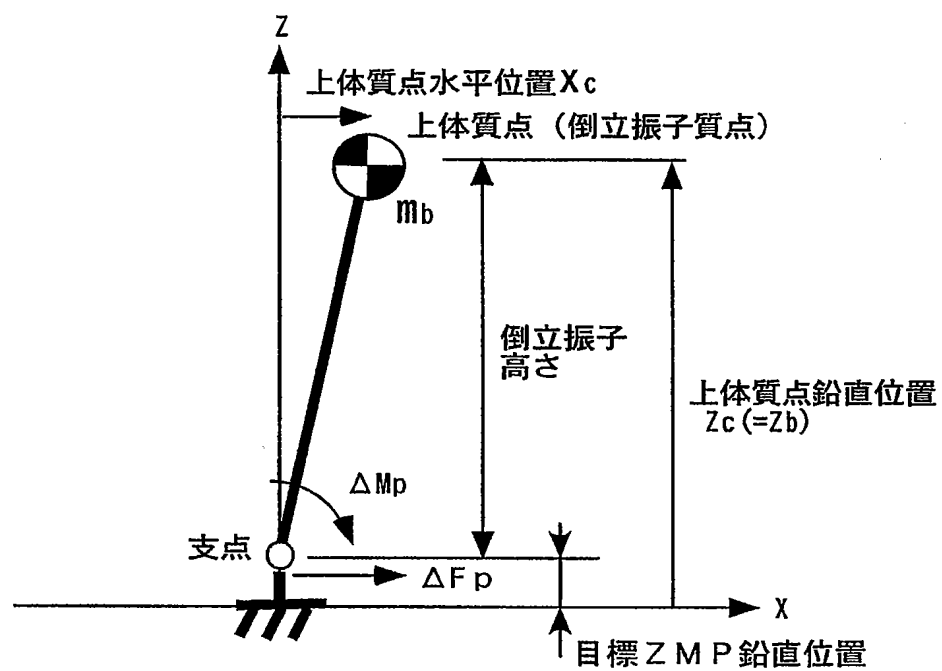


FIG. 44  
(上体姿勢角補正用摂動モデル)

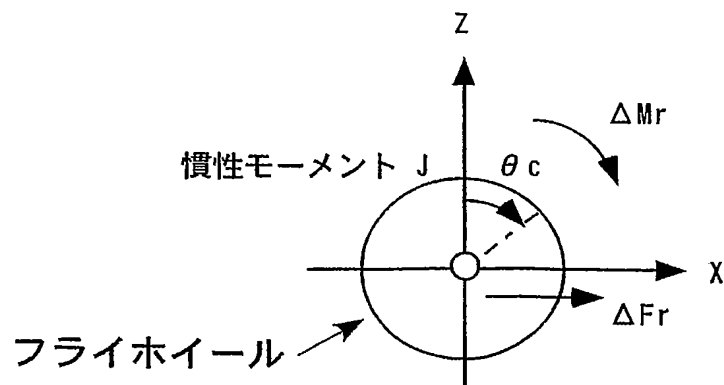
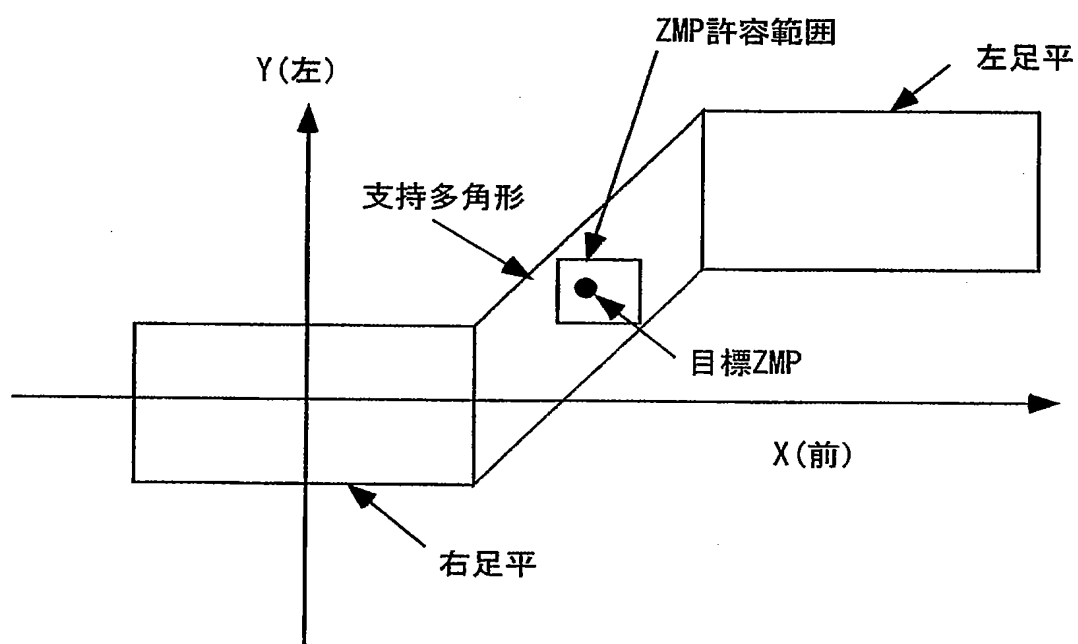


FIG. 45  
(支持多角形とZMP許容範囲)



37/52

FIG. 46

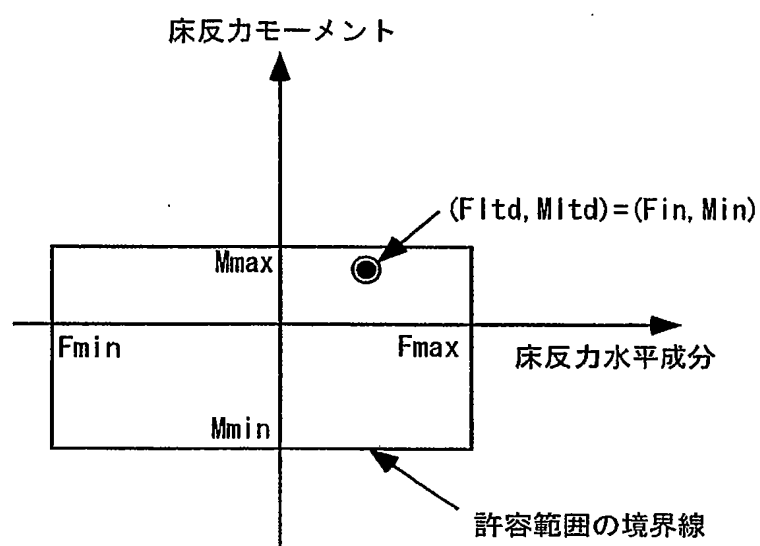
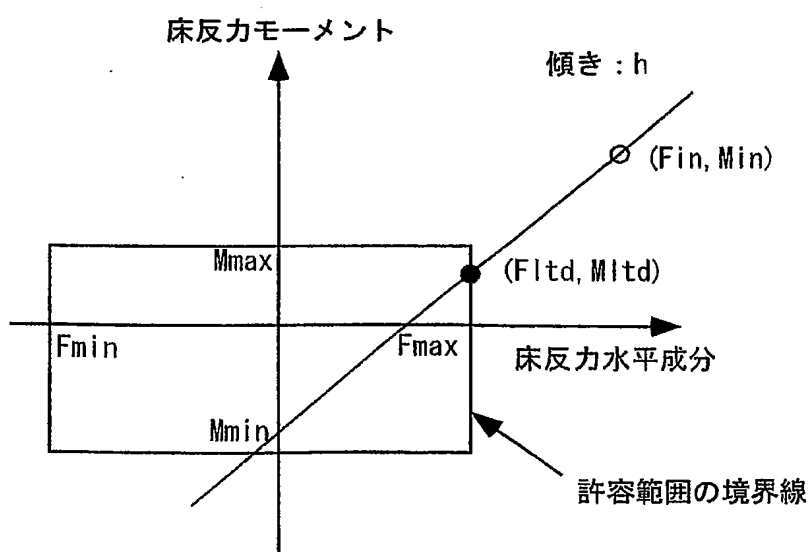


FIG. 47



38/52

FIG. 48

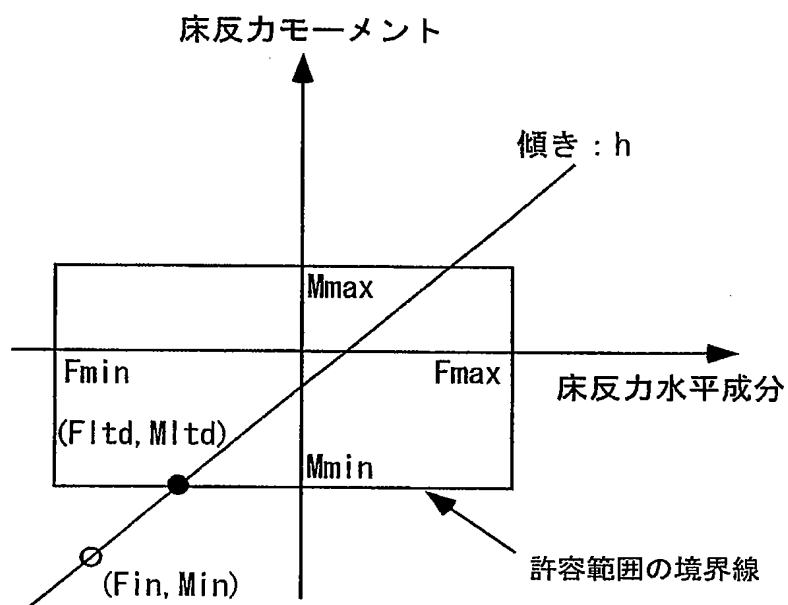
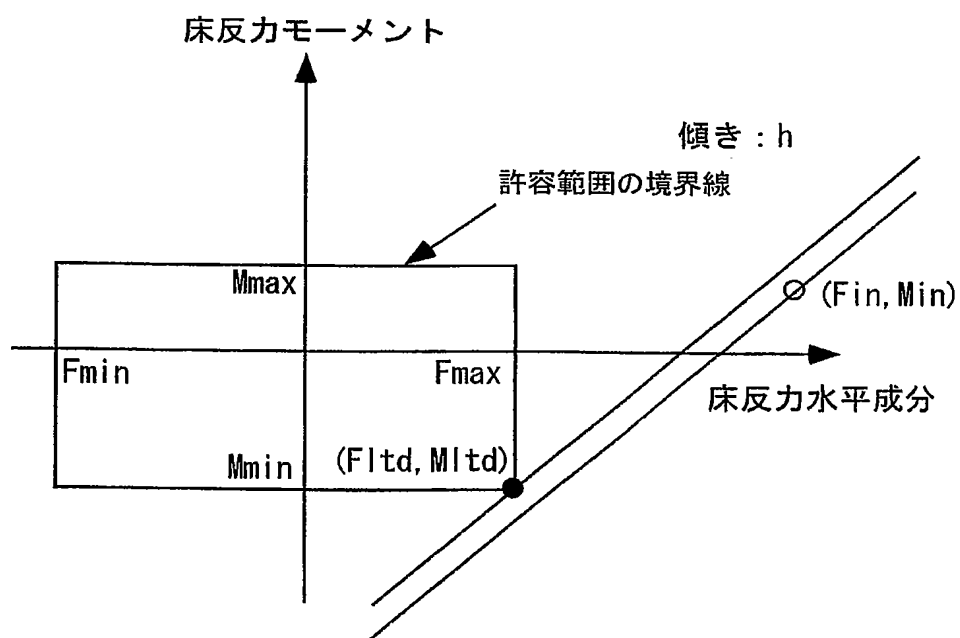


FIG. 49



39/52

FIG. 50

(逆動力学フルモデルを使う補正、単純化モデル歩容の入力を補正しない方式、フルモデルFB補正型)

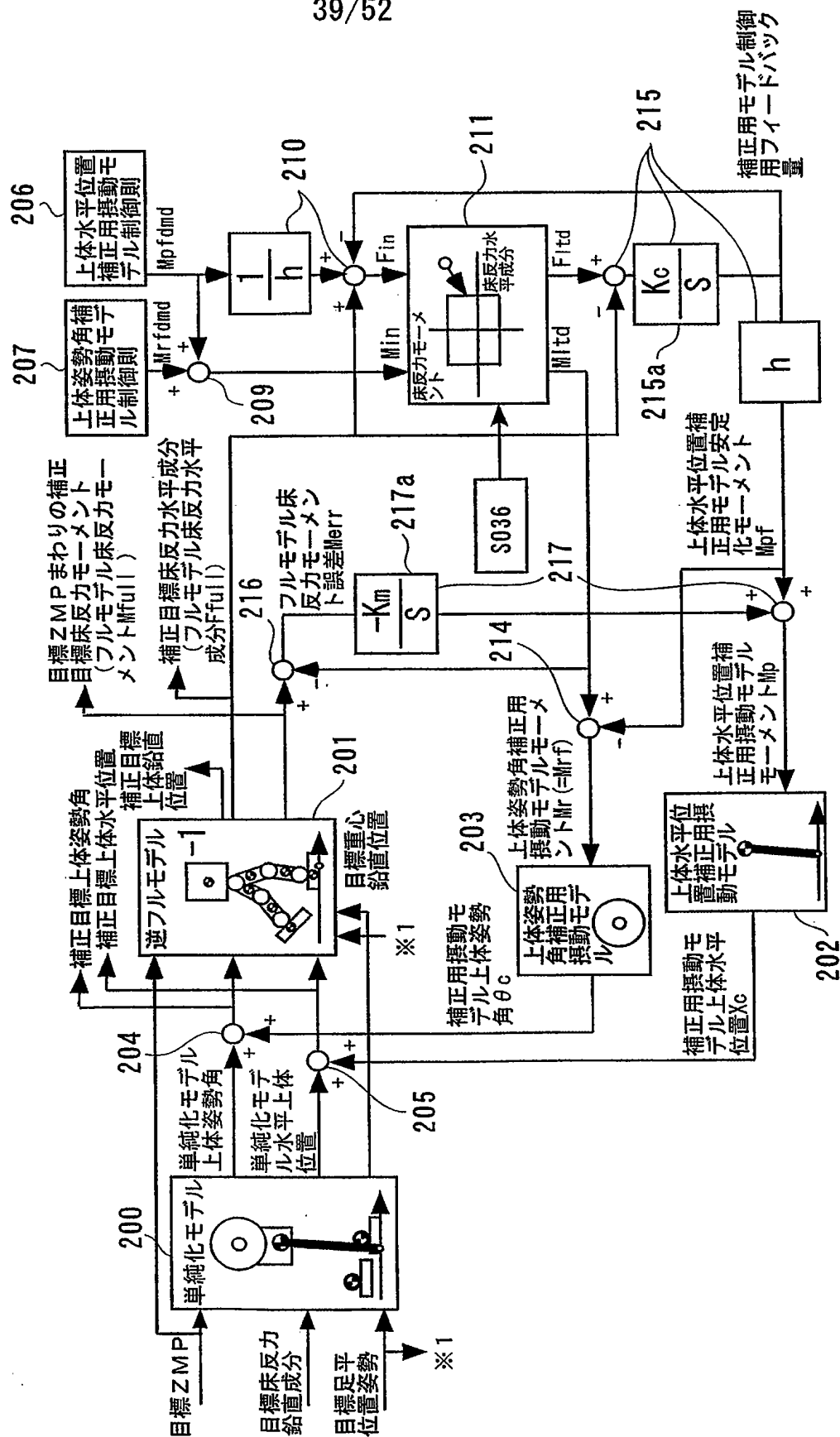


FIG. 51

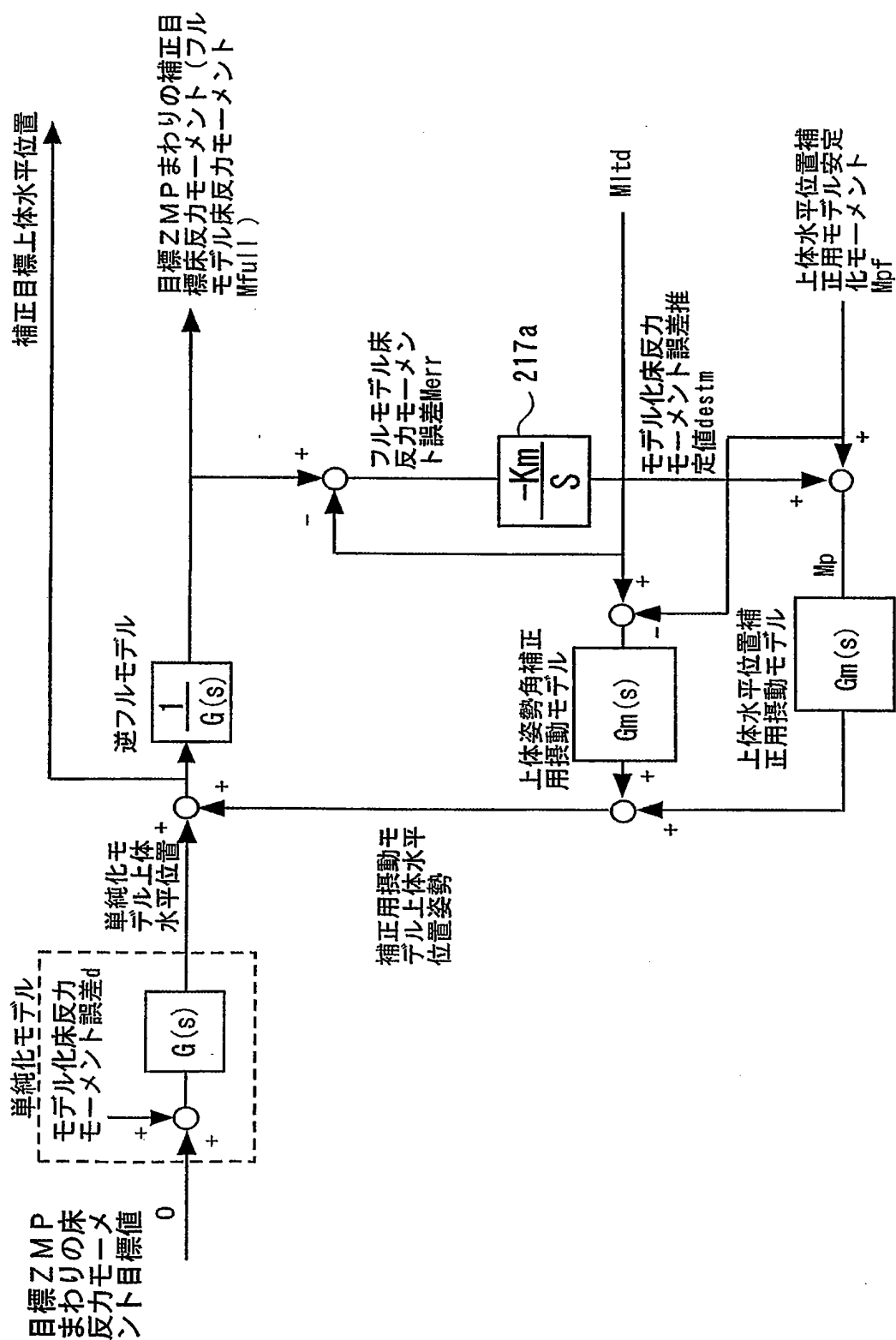
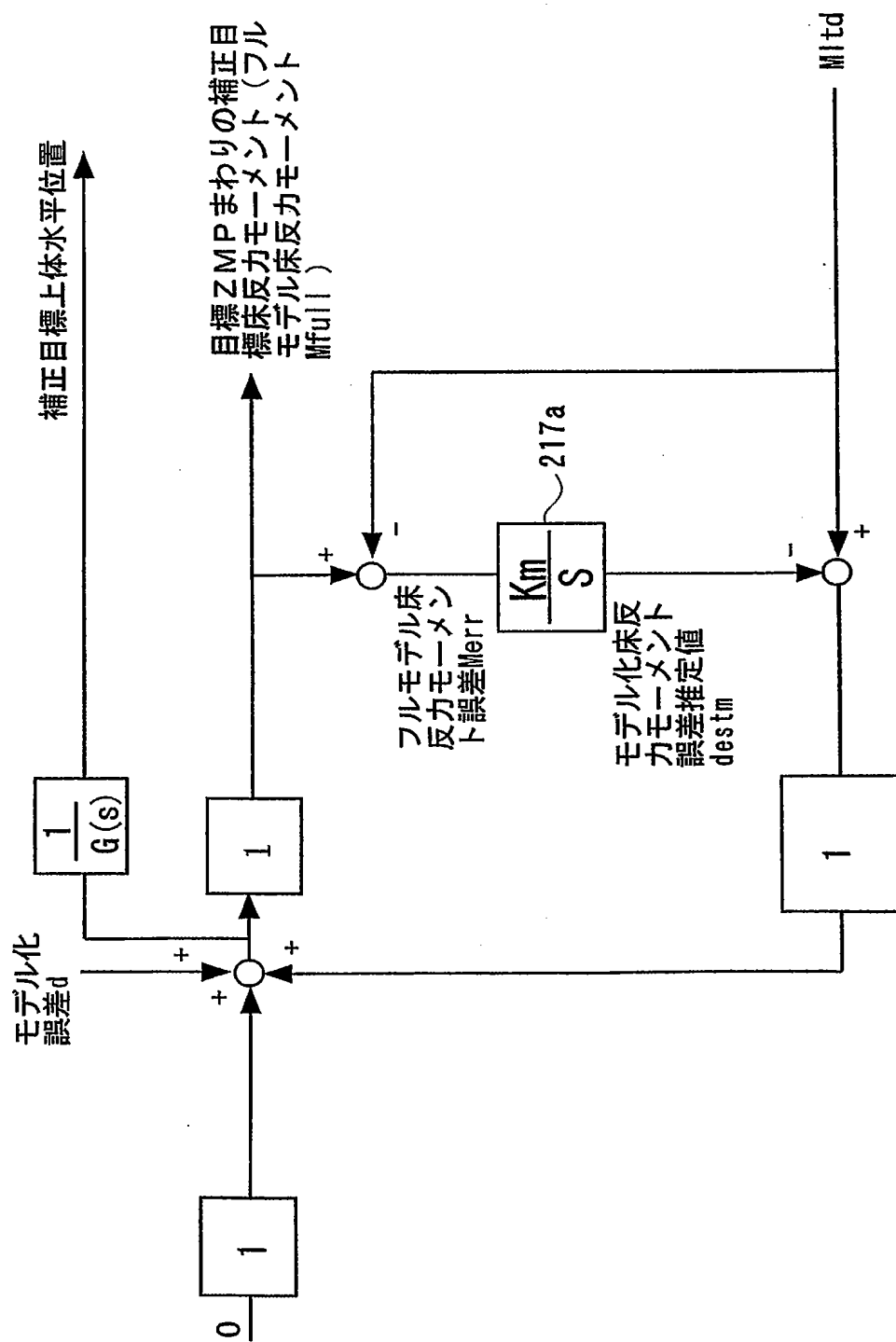


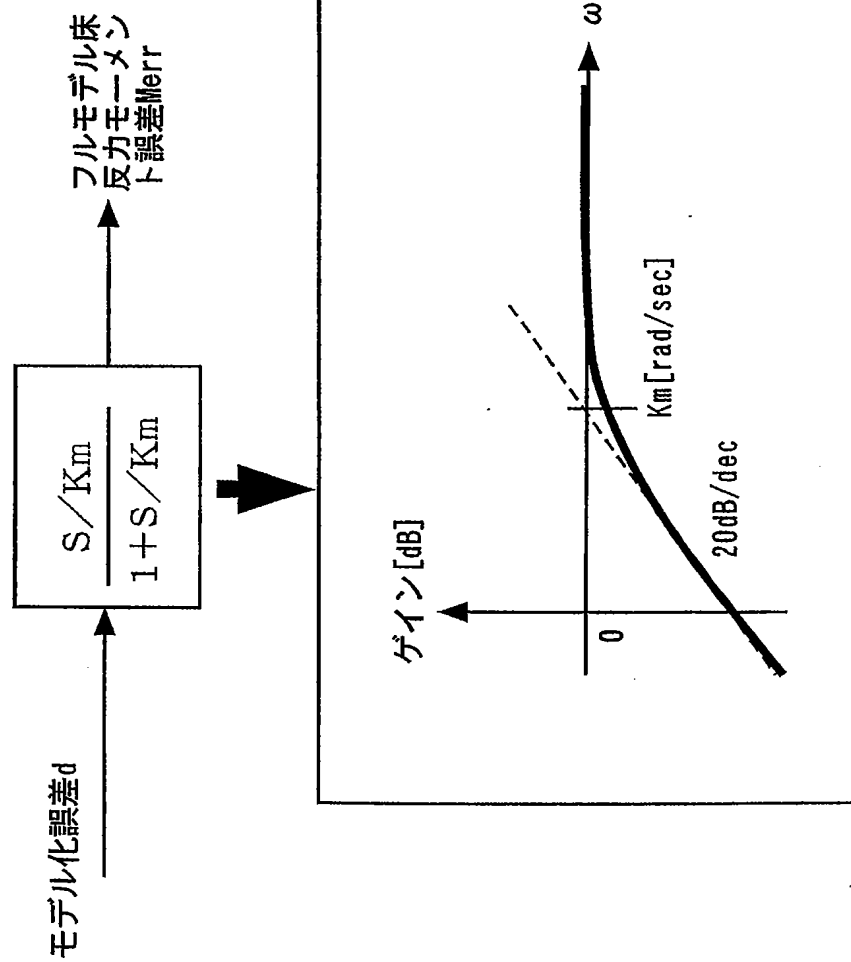
FIG. 52



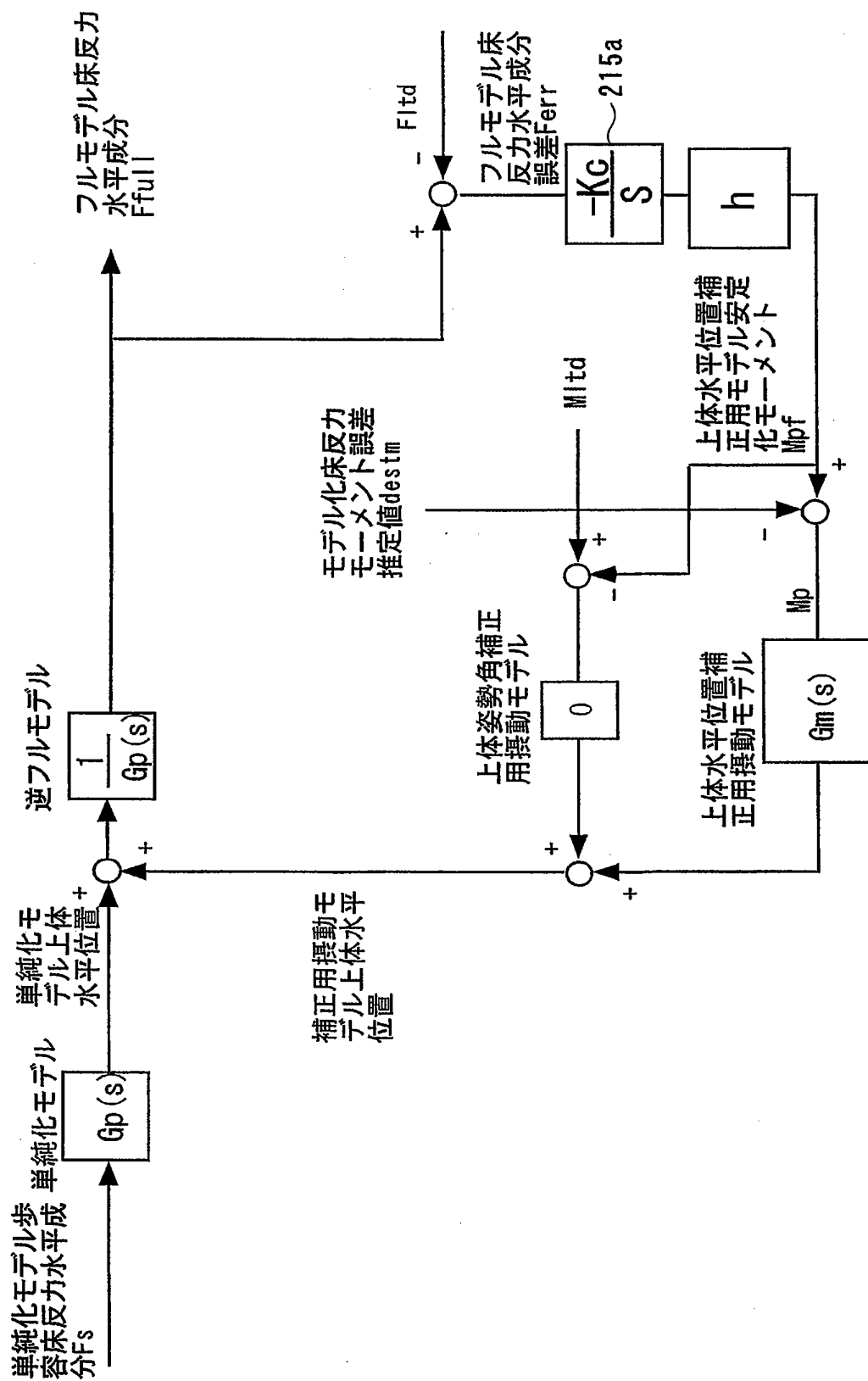


42/52

FIG. 53

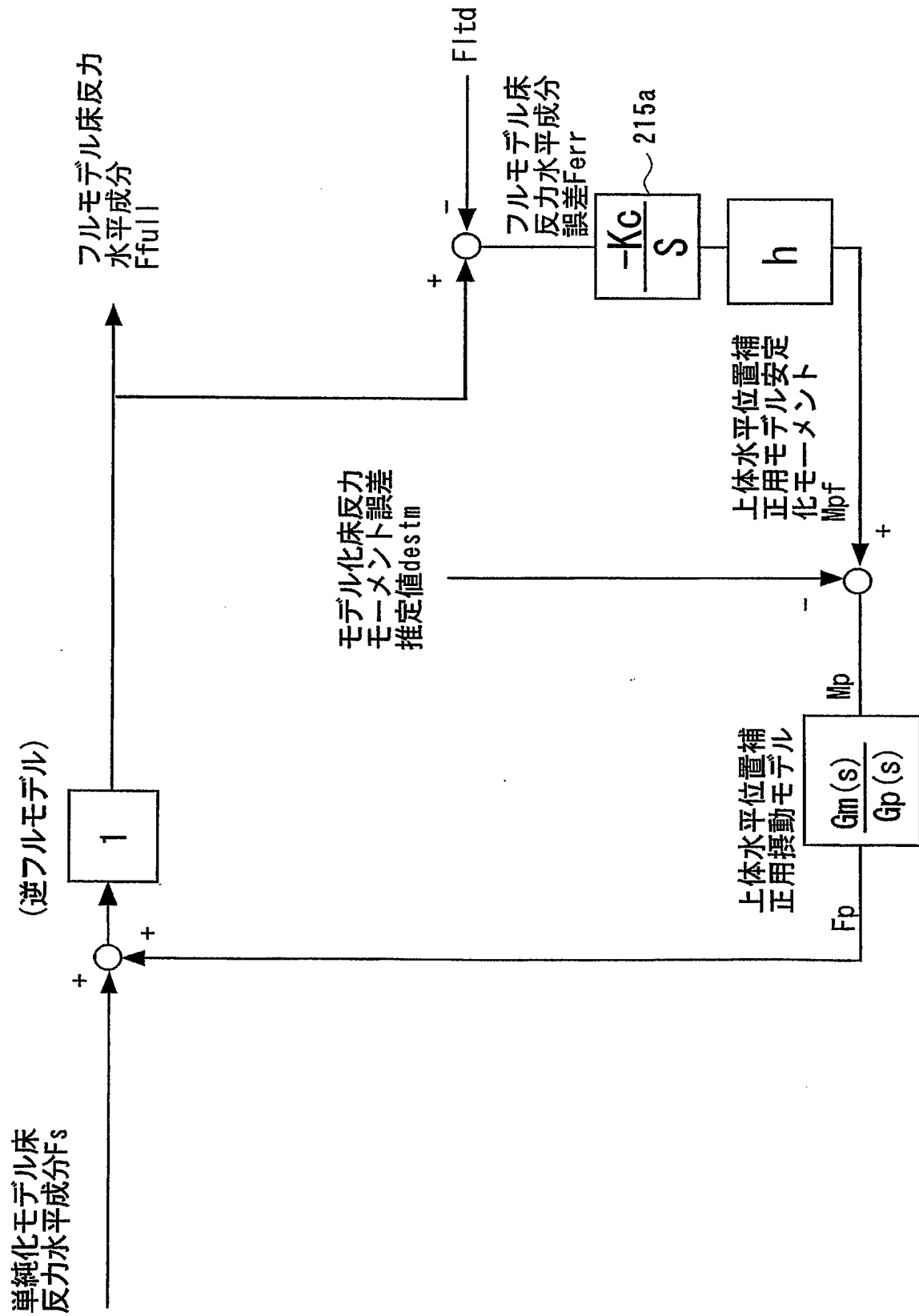


**FIG. 54**



44/52

FIG. 55



45/52

FIG. 56

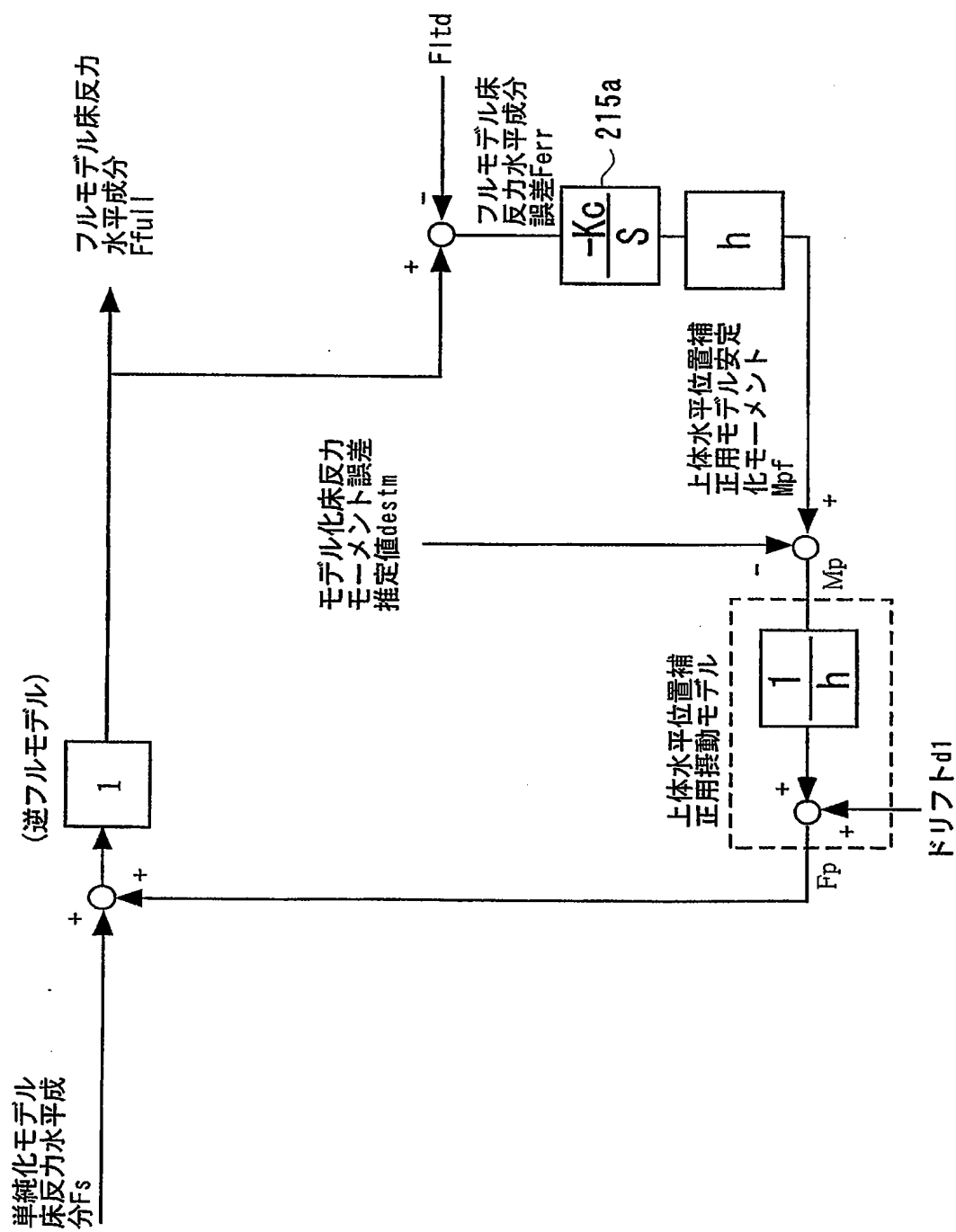


FIG. 57

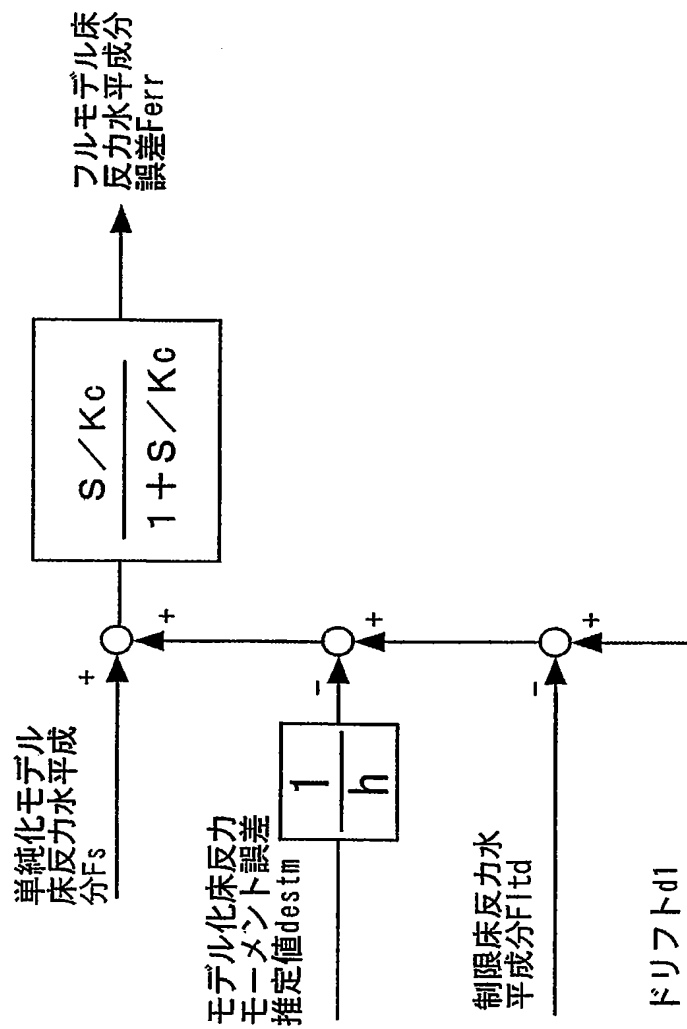


FIG. 58

(逆動力学フルモデルを使う補正、単純化モデル歩容の入力を補正しない方式、フルモデルFB補正型)

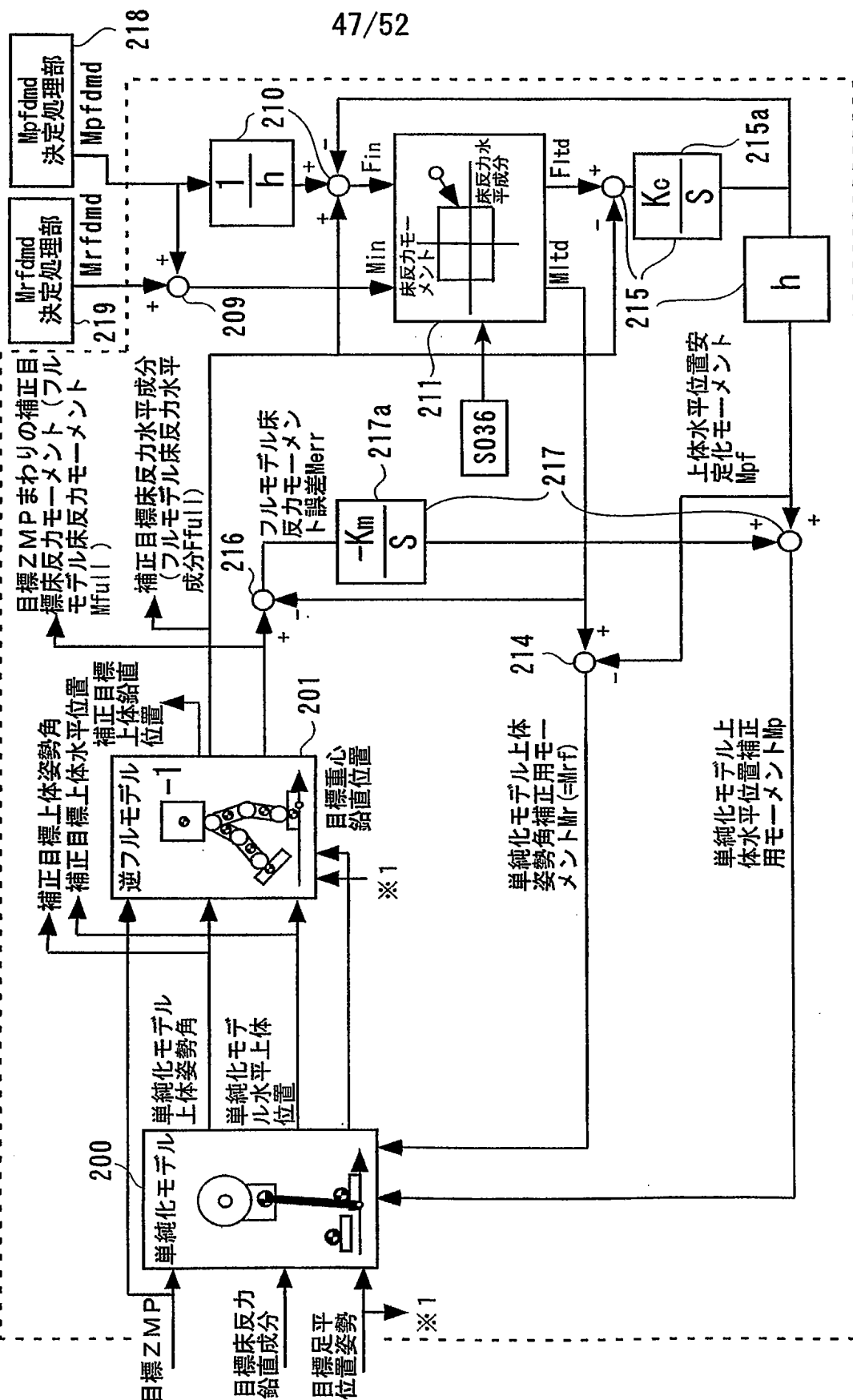
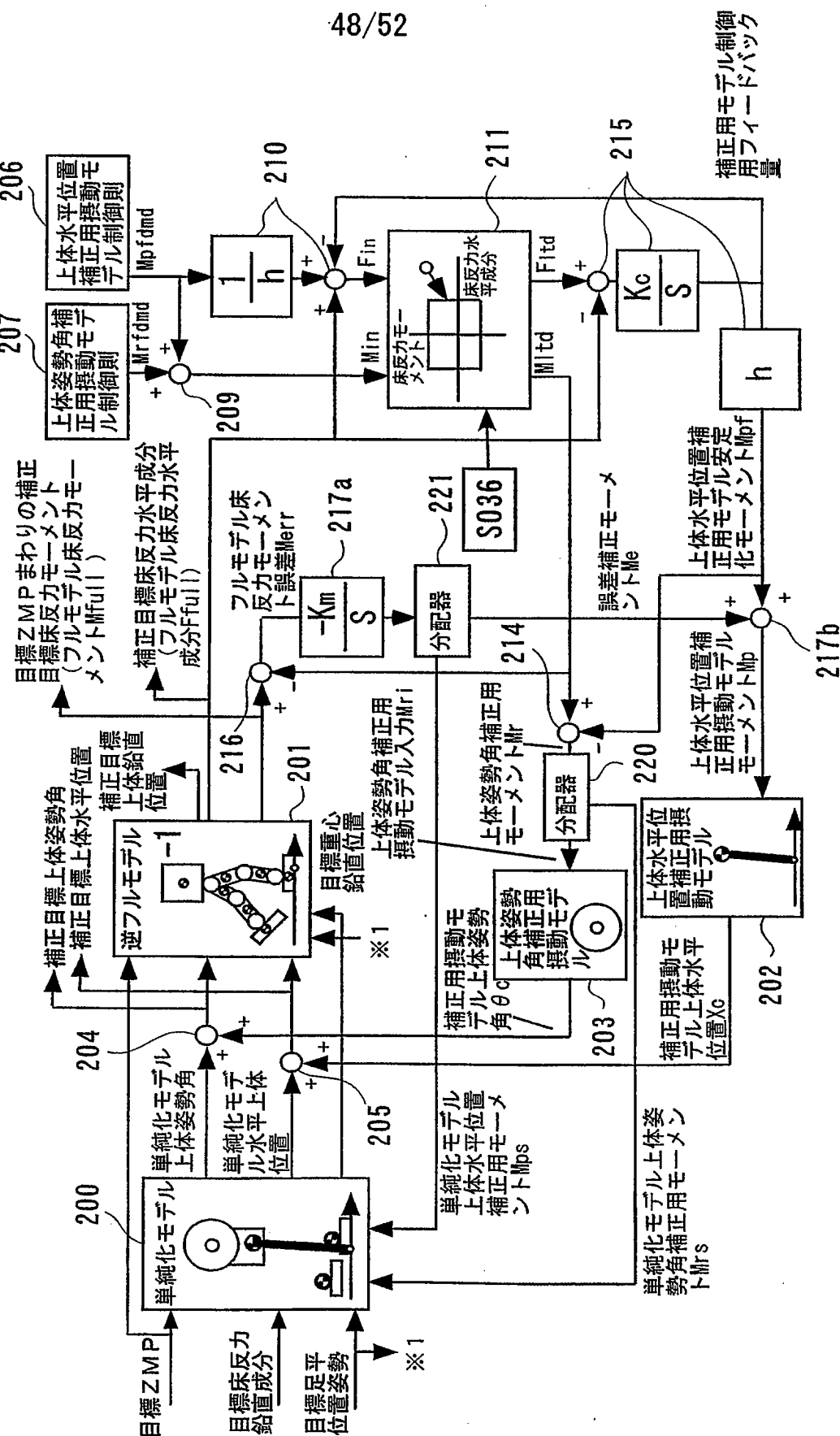


FIG. 59

(逆動力学フルモデルを使う補正、単純化モデル歩容の入力を補正する方式、フルモデルFB補正型)



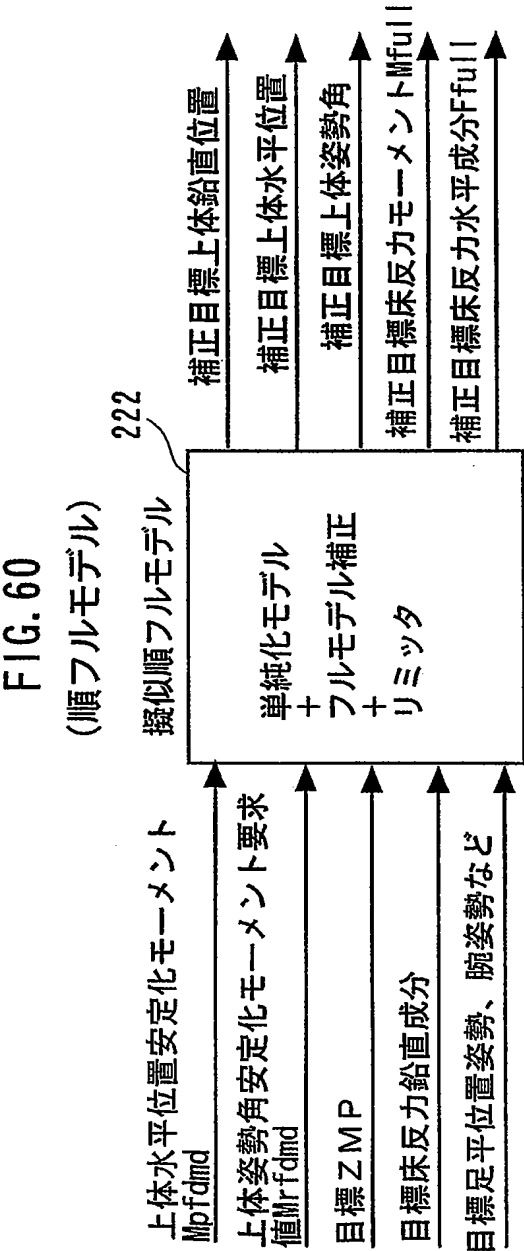
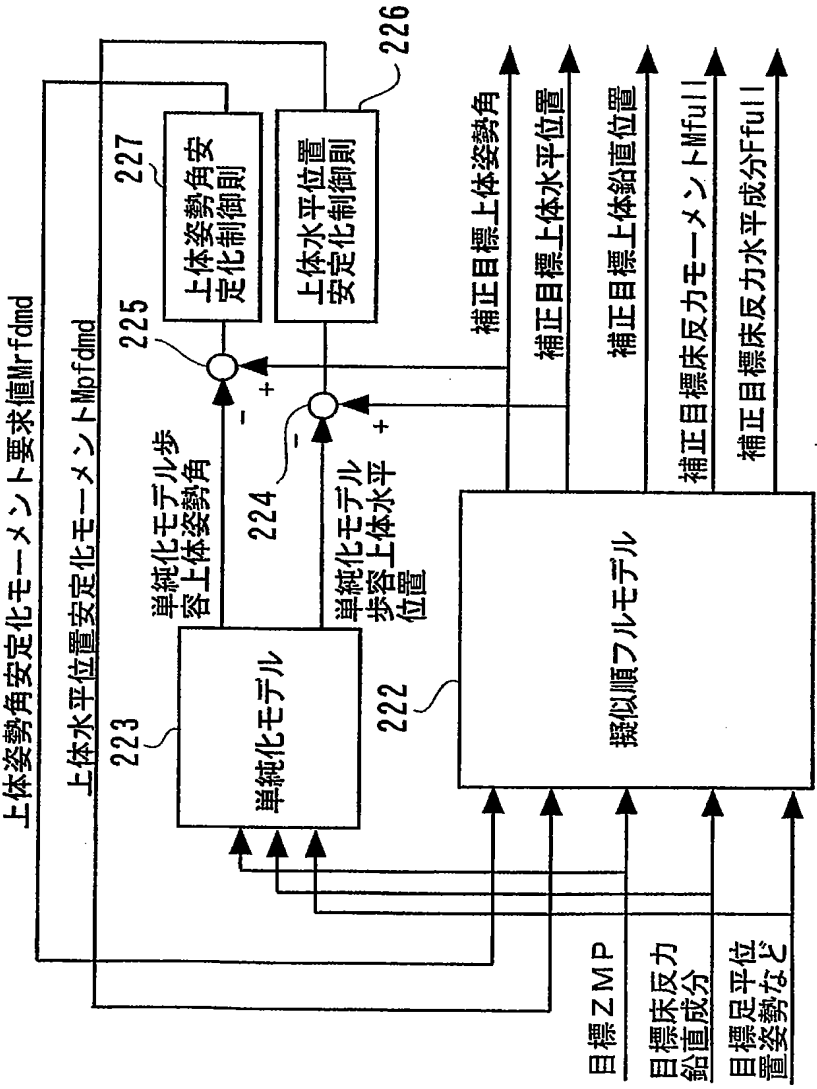


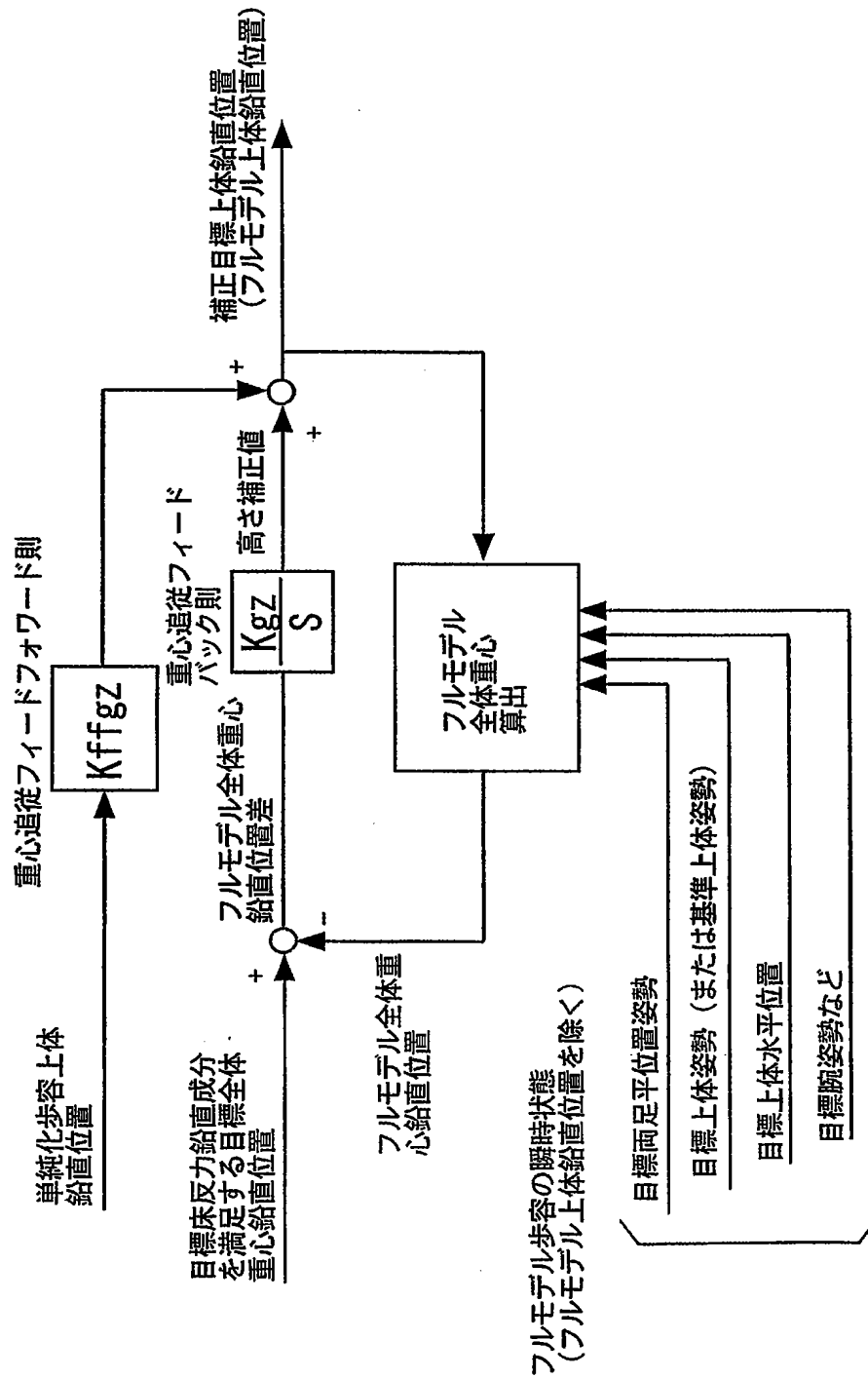


FIG. 61  
(順フルモデルを用いた歩容補正)



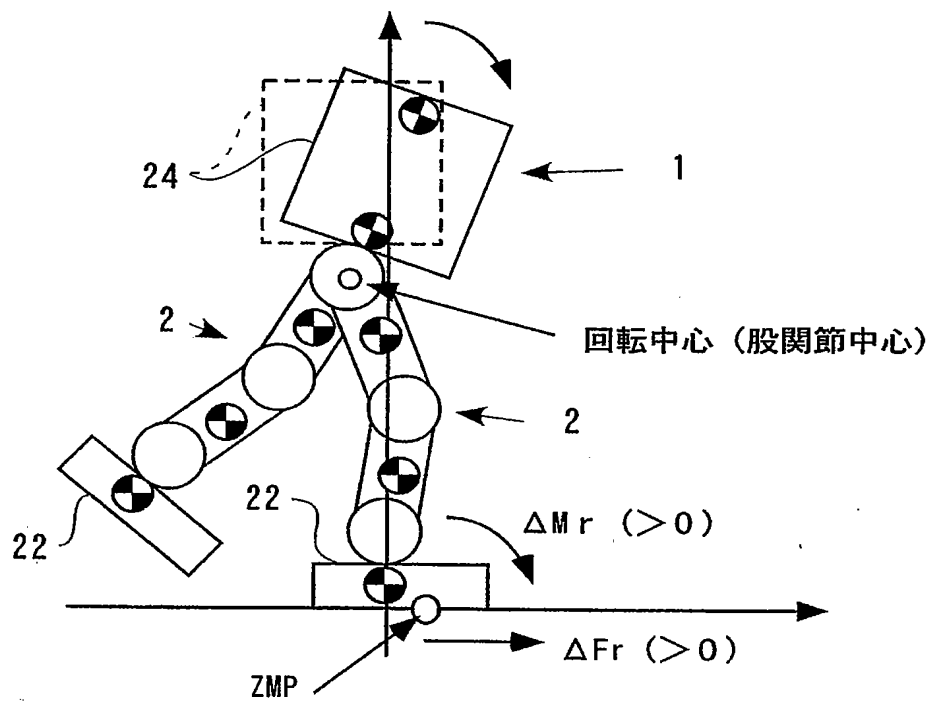
51/52

FIG. 62



52/52

FIG. 63  
(腰中心の上体傾斜)



# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP02/13784

## A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

Int.Cl<sup>7</sup> B25J5/00, B25J13/00

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

## B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

Int.Cl<sup>7</sup> B25J5/00, B25J13/00

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Jitsuyo Shinan Koho	1926-1996	Toroku Jitsuyo Shinan Koho	1994-2003
Kokai Jitsuyo Shinan Koho	1971-2003	Jitsuyo Shinan Toroku Koho	1996-2003

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

JICST

## C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	EP 572285 A1 (HONDA GIKEN KOGYO KABUSHIKI KAISHA), 01 December, 1993 (01.12.93), Claims; all drawings & US 5459659 A & JP 5-337849 A	1-42
A	EP 856457 A2 (HONDA GIKEN KOGYO KABUSHIKI KAISHA), 05 August, 1998 (05.08.98), Claims; all drawings & US 5936367 A & JP 10-217161 A	1-42
A	EP 1018467 A1 (HONDA GIKEN KOGYO KABUSHIKI KAISHA), 12 July, 2000 (12.07.00), Claims; all drawings & US 6301524 B1 & JP 10-86081 A	1-42

☒ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☐ See patent family annex.

\* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance  
 "E" earlier document but published on or after the international filing date  
 "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)  
 "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means  
 "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention  
 "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone  
 "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art  
 "&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search  
08 April, 2003 (08.04.03)

Date of mailing of the international search report  
22 April, 2003 (22.04.03)

Name and mailing address of the ISA/  
Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP02/13784

## C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
E, A	WO 02/40224 A1 (HONDA GIKEN KOGYO KABUSHIKI KAISHA), 23 May, 2002 (23.05.02), Claims; all drawings (Family: none)	1-42
E, A	JP 2002-326173 A (HONDA GIKEN KOGYO KABUSHIKI KAISHA), 12 November, 2002 (12.11.02), Claims; all drawings (Family: none)	1-42

## A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC))

Int. Cl<sup>7</sup> B25J5/00, B25J13/00

## B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (IPC))

Int. Cl<sup>7</sup> B25J5/00, B25J13/00

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報 1926-1996年

日本国公開実用新案公報 1971-2003年

日本国登録実用新案公報 1994-2003年

日本国実用新案登録公報 1996-2003年

国際調査で使用した電子データベース (データベースの名称、調査に使用した用語)

JICST

## C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求の範囲の番号
A	EP 572285 A1 (HONDA GIKEN KOGYO KABUSHIKI KAISHA), 1993. 12. 01, 特許請求の範囲, 全図 & US 5459659 A & JP 5-337849 A	1-42
A	EP 856457 A2 (HONDA GIKEN KOGYO KABUSHIKI KAISHA), 1998. 08. 05, 特許請求の範囲, 全図 & US 5936367 A & JP 10-217161 A	1-42

☒ C欄の続きにも文献が列挙されている。☐ パテントファミリーに関する別紙を参照。

## \* 引用文献のカテゴリー

「A」特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの

「E」国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの

「L」優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献 (理由を付す)

「O」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献

「P」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

の日の後に公表された文献

「T」国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの

「X」特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの

「Y」特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの

「&amp;」同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

08.04.03

国際調査報告の発送日

22.04.03

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁 (ISA/JP)

郵便番号100-8915

東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官 (権限のある職員)

高田 元樹

3C 9821

電話番号 03-3581-1101 内線 3322

C (続き). 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求の範囲の番号
A	EP 1018467 A1 (HONDA GIKEN KOGYO KABUSHI KI KAISHA), 2000.07.12, 特許請求の範囲, 全図 & US 6301524 B1 & JP 10-86081 A	1-42
EA	WO 02/40224 A1 (HONDA GIKEN KOGYO KABUS HIKI KAISHA), 2002.05.23, 特許請求の範囲, 全図 (ファミリーなし)	1-42
EA	JP 2002-326173 A (本田技研工業株式会社), 2 002.11.12, 特許請求の範囲, 全図 (ファミリーなし)	1-42